

令和 2 年度 修士論文

飛行型標準光源を用いた 宇宙線望遠鏡の視野方向評価



提出者

信州大学大学院 総合理工学研究科 工学専攻

佐野 賢吾

序論

宇宙空間を飛び交い地球にも絶えず到来する高エネルギー粒子，宇宙線に注目した研究が世界中でいくつも行われている．中でも特に高いエネルギーを持つ”超高エネルギー宇宙線”の観測を行う Telescope Array 実験では，観測手法の 1 つとして宇宙線が地球大気に突入したときに引き起こされる蛍光現象を大気蛍光望遠鏡によって記録している．観測記録を正確に解析するためには望遠鏡の較正が必須となり，望遠鏡には各種パラメータを補正するための較正装置群が組み込まれている．ここに，さらなる正確な解析を目指し，既存装置群に不足する部分を較正できる装置として飛行型の標準光源装置 Opt-opter が新規開発された．Opt-copter は無人航空機に標準光源と座標記録用の高精度 GPS モジュールを搭載した装置であり，可搬性，飛翔性を備えているため較正したい望遠鏡の視野内に任意に光源を設置可能である．Opt-copter はその搭載する光源や測位モジュールから，位置が正確に判明している安定した光源であるといえ，そのような光源を望遠鏡で観測することで，望遠鏡の光学特性を把握し較正することができる．特に，望遠鏡の視野方向の確認や，コマ収差の確認など幾何光学的な特性の検証が期待される．

我々は実際に Telescope Array 実験サイトにおける Opt-copter の運用と，取得データを用いた大気蛍光望遠鏡の視野方向確認解析を行った．2 種類の解析手法を考案し，Telescope Array 実験の一部の望遠鏡について既存の較正手法を上回る精度で視野方向を特定した．本稿では Opt-copter の概要と運用，望遠鏡の視野方向確認について解析手法と得られた結果を説明する．

目次

第 1 章	宇宙線	1
1.1	宇宙線とは	1
1.2	宇宙線のエネルギースペクトル	1
1.3	宇宙線の質量組成	2
1.4	宇宙線の到来方向	3
1.5	宇宙線観測と空気シャワー	3
第 2 章	宇宙線望遠鏡実験	5
2.1	地表検出器:SD	6
2.2	大気蛍光望遠鏡:FD	6
2.2.1	光学系	7
2.2.2	PMT カメラ	8
2.2.3	データ収集システム	8
第 3 章	望遠鏡の較正	11
3.1	CRAYS	11
3.2	YAP	12
3.3	Xe-フラッシャー	13
3.4	UV-LED パルサー	13
3.5	大気モニター	14
3.5.1	Central Laser Facility	14
3.6	天候モニタリング	15
第 4 章	飛行型標準光源	16
4.1	Opt-copter	16
4.2	UAV Unmanned Aerial Vehicle	17

4.3	光源	18
4.3.1	LED	19
4.3.2	ディフューザー	19
4.4	測位用 GPS モジュール	19
第 5 章	測位用 GPS モジュール精度評価試験	22
5.1	試験目的	22
5.2	試験概要	22
5.3	試験で得られた GPS モジュールの記録と分析	25
5.4	結果	28
第 6 章	Telescope Array 実験サイトでの Opt-copter 観測	29
6.1	試験概要	29
6.2	離着陸ポイントと飛行区域	30
6.3	フライトプランと取得記録	30
第 7 章	FD の総受光量分布から得た PMT の輪郭探索による視野方向解析	33
7.1	PMT 境界での総受光量の減少と視野方向解析手法	33
7.1.1	光源位置と総受光量の補間生成	35
7.1.2	PMT の輪郭とスポットサイズの関係	39
7.2	視野方向差の定量化	39
7.3	解析結果	40
7.4	誤差幅の検討	45
第 8 章	FD の受光量重心と光源位置の比較による視野方向解析	47
8.1	受光量重心の算出と実際の記録	47
8.2	受光量重心と光源位置の差	48
8.3	解析結果	50
8.4	コマ収差の影響やフライトの偏り検討	51
8.5	誤差幅の検討	52
第 9 章	視野方向解析結果の比較	57
第 10 章	結論	59
10.1	まとめ	59
10.2	今後の展望	59

第1章

宇宙線

1.1 宇宙線とは

宇宙線とは宇宙空間を飛び回る高エネルギーの放射線のことを指す。宇宙線の主な成分は陽子であり、様々な原子核を含んでいる。また、宇宙線は絶えず地球にも降り注いでいる。宇宙線の存在は1910年ごろに電離箱と気球を用いて明らかにされた。放射線が土壌から放出されているだけならば、高度が上がるにつれて気球に搭載された電離箱の電離は減少、すなわち放射線の強度が低下するはずであるが、高度の上昇に応じて電離は増加していき地球外からなんらかの放射線が到来していることが示された。その後現在に至るまでの100年以上の期間、様々な宇宙線の観測、研究は進められてきた。これまでに宇宙線は 10^8eV から 10^{20}eV という幅広いエネルギー領域で観測されてきた。しかし、宇宙線の起源や加速機構など解明されていない部分があり、特に到来頻度の低い高エネルギーをもつ宇宙線は未だ多くの謎に包まれている。また、地球に到来した宇宙線は、大きく一次宇宙線と二次宇宙線に分けられる。一次宇宙線は宇宙空間から地球に降ってくる宇宙線そのもので、二次宇宙線は一次宇宙線が地球大気と反応してできる二次粒子のことである。

1.2 宇宙線のエネルギースペクトル

太陽活動の影響を受けない 10^{10}eV を超えるエネルギー領域では、宇宙線の到来頻度はエネルギーのべき乗 $F(E)=K \times E^{-\gamma}$ で近似できる。一次宇宙線のエネルギースペクトル分布を図1.1に示す。 γ はほぼ3であるが、エネルギー領域によってわずかに異なる。 10^{15}eV 程度までは γ は約2.7であり、そこから $10^{18.5}\text{eV}$ 程度まで約3.1、そこから γ は約2.7となる。このスペクトルの折れ曲がりはいずれ

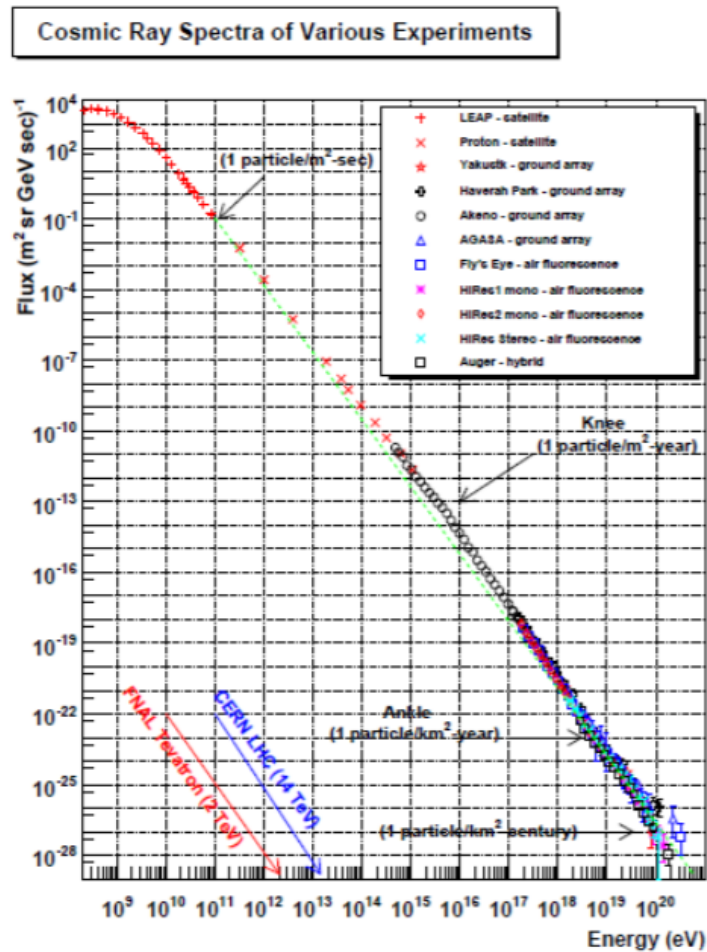


図 1.1 一次宇宙線のエネルギースペクトル分布

“knee”, “ankle” と呼ばれている。これらの変化は加速機構や宇宙空間における伝播の変化が関係しているのではないかと考えられている。

1.3 宇宙線の質量組成

到来頻度の高い太陽宇宙線や低エネルギー領域の銀河宇宙線については気球や人工衛星などを用いて一次宇宙線を直接観測できる。高度組成探査機に搭載された宇宙線同位体分光器による直接観測により、組成や同位体比が高精度で測定されている。その結果から宇宙線の成分は陽子が90%、ヘリウム原子核が8%、その他鉄原子核までの思い荷電粒子で構成されていることがわかっている。宇宙線の化学組成と太陽系の化学組成を比較すると各原子量は類似しているが、存在量が異なる原子核もある。これは宇宙線が地球に到来するまでに星間物質と衝突することで原子核

が粉碎，別の原子核が生成されることや，宇宙線の起源，加速機構によって生じると考えられる．したがって，宇宙線の組成は起源や加速機構，伝播中に衝突した星間物質などを知るうえで大きな手がかりとなる．また 1963 年に超高エネルギー宇宙線は宇宙背景放射との相互作用により地球に到来する前にエネルギーを失うと Greisen, Zatsepin, Kuzmin により予測された．これを提唱者の頭文字から GZK カットオフと呼ぶ．陽子，原子核ではエネルギーの失われ方に差があるので宇宙線の組成を知ることはやはりその起源に迫ることにつながる．

1.4 宇宙線の到来方向

宇宙空間における電磁場は，宇宙線の化学組成において大部分を占める荷電粒子を変更させる．これによって銀河宇宙線の到来方向は等方的になり宇宙線の起源や加速機構を特定することは難しい．しかし，その中でも 10^{18}eV を超えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線は銀河系内磁場の影響による偏向が小さいとされており，到来方向と起源天体との相関が見られると期待されている．超高エネルギー宇宙線はこれまで 10^{20}eV を超えるものも観測されている．超高エネルギー宇宙線の起源は活動銀河核やガンマ線バーストなどの極めて激しい天体現象が考えられるが，未だ起源天体や加速機構は解明されていない．超高エネルギー宇宙線の起源を解明するため，これまでに AGASA 実験 (Akeno Giant Air Shower Array, 1991-2004) や High-resolution Fly' s Eye 実験 (1997-2006)，近年では日米韓露による共同実験 TelescopeArray(2008-) や欧米中心の PierreAuger 実験 (Auger, 2004-) によって超高エネルギー宇宙線の観測が行われている．

1.5 宇宙線観測と空気シャワー

Pierre Auger は 1938 年に，150m 離して設置した放射線検出器で観測した結果から複数の検出器の同時反応が存在すること，それらの起源が，宇宙線が上空で大気との相互作用を起こし生成されたシャワーであることを示した．宇宙線は窒素や酸素などの大気中の原子核と相互作用し粒子の多重発生を起こす．さらにこの二次粒子もまた粒子を生成する．これが空気シャワー現象である．通常，空気シャワーは高エネルギーハドロンによるハドロンシャワーと高エネルギーガンマ線による電磁シャワーからなる．宇宙線の到来頻度はほぼエネルギーの 3 乗で減少するのでエネルギーが高くなるほど到来頻度が急激に少なくなる．到来頻度の高い低エネルギーの宇宙線は観測装置で直接観測することができる．しかし， 10^{14}eV 以上の宇

宇宙線は到来頻度が少なく観測には大きな検出面積と観測時間が必要となるので、直接観測は難しい。そこで、このエネルギー以上の宇宙線に対しては、一次宇宙線が大気と相互作用して生成される二次宇宙線シャワーを大きな検出面積を持つ検出器で間接的に測定されている。

第 2 章

宇宙線望遠鏡実験

Telescope Array(TA) 実験は 500 台以上の地表検出器 (Surface Detector:SD) と 3 ステーションに設置された大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector:FD) を用いた超高エネルギー宇宙線の観測を行う実験である。米国ユタ州ミラード郡, 北緯 39 度, 西経 113 度, 標高 1400m ほどの砂漠地帯が実験サイトとなっている。街明かりが少なく, 晴天率は 60% 程度で大気蛍光の観測に適しており, また多数の地表検出器を設置するのに十分な広さを有する。TA 実験における実験装置の配置を図 2.1 に示す。多数の地表検出器は 1.2km 間隔でアレイ上に配置され, その地表検出器アレイを取り囲むように大気蛍光望遠鏡ステーションが 3 カ所 (Black Rock Mesa”BRM”, Long Ridge”LR”, Middle Drum”MD”) に設置されている。粒子検出器と蛍光望遠鏡の 2 種の装置で宇宙線観測を行うことで, 両機器の系統誤差の見積もりを行えるだけでなく, より高いエネルギー決定精度, 到来方向決定精度で観測を行うことができる。また, 観測範囲を増やすための計画 TA_{x4} が進行中である。地表検出器と望遠鏡を増やし観測面積は現在の 4 倍となる予定である。

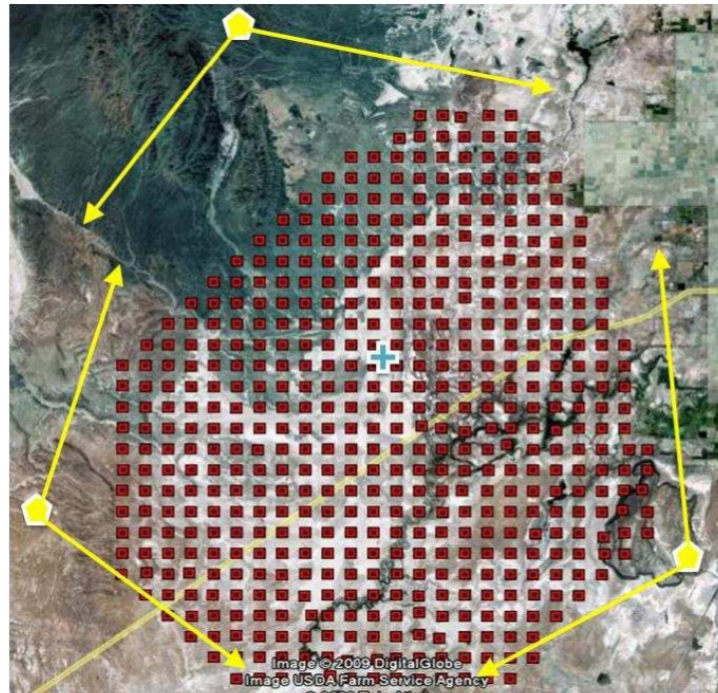


図 2.1 Telescope Array の機器配置

2.1 地表検出器:SD

図 2.2 に地表検出器の外観を示す。TA 実験の地表検出器はプラスチックシンチレータを使用し、荷電粒子を直接観測する検出器である。発生した光を光ファイバーを用いて PMT に誘導している。地表検出器はシンチレータ無線通信アンテナ、ソーラーパネルを収納したステンレスボックス、エレクトロニクスとバッテリーを収納するステンレスボックスから構成される。ステンレスボックスの内部構造を図 2.3 に示す。ソーラーパネルとバッテリーを電力源として、外部からの供給なしに 24 時間 365 日自立稼働し観測を行える。GPS により時刻情報を取得し通信塔を介して 2.5GHz 帯の通信を行う。

2.2 大気蛍光望遠鏡:FD

大気蛍光望遠鏡は空気シャワーが大気中の窒素分子等を励起することで発生する大気蛍光を複合球面鏡で反射集光し、256 本の PMT カメラに入光して宇宙線の撮像観測を行っている。3 ヲ所の大気蛍光望遠鏡ステーションには、ステーションごと 12~14 台の望遠鏡が設置されている。ステーションには望遠鏡前にシャッター



図 2.2 地表検出器の外観

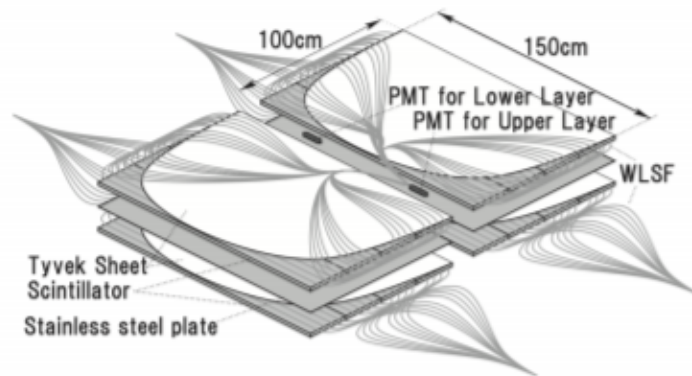


図 2.3 シンチレータボックス内構造

が設置されており観測を行わないときはシャッターが閉じていることで望遠鏡は保護されている。望遠鏡ステーション、望遠鏡の外観を図 2.4 に示す。別ステーション同士でステレオ観測することで空気シャワーのエネルギーや到来方向を精度良く解析することが可能になる。

2.2.1 光学系

大気蛍光望遠鏡ステーションには上下視野に対応する大気蛍光望遠鏡が上下 2 段で 1 対に設置されており、さらにこの組み合わせを横に 6 対設置することで広視野での観測を実現している (図)。大気蛍光望遠鏡 1 台あたりの視野は方位角 18.0 度、仰角 15.5 度であり、上下大気蛍光望遠鏡同士の視野を 1 度ずつ重なるように配置するので、1 ステーションの視野は方位角 108 度、仰角 3~33 度である。大気蛍光

望遠鏡に用いられる球面望遠鏡は球面鏡を 18 枚組み合わせて、曲率半径 6.067m、口径 3.3m とした合成鏡である。大気蛍光望遠鏡望遠鏡を構成する鏡は対辺の距離が 660mm の 6 角形で、表面にはコーティングを施してある。鏡は焦点距離でのスポットサイズが 30mm 以下になるよう調整され配置されている。

2.2.2 PMT カメラ

大気蛍光望遠鏡の PMT カメラは、 16×16 に並べた計 256 本の PMT(浜松ホトニクス社 R9508) で構成され、各 PMT の感面上には BG3 フィルター (Schott 社製) が取り付けられている。使用する PMT とカメラボックスを図 2.5 に示す。BG3 フィルターを取り付けることにより、宇宙線の大気蛍光の波長域 300~400nm 以外の光を遮断する事が可能になる。これにより、夜光や外灯等のノイズの多くを除去することができ、大気蛍光望遠鏡が宇宙線以外のイベントでトリガすることが少なくなる。

2.2.3 データ収集システム

大気蛍光望遠鏡のデータ取得用エレクトロニクスには VME ボードが採用されており、Signal Digitizer and Finder(SDF), Track Finder(TF), Central Trigger Distributor(CTD) で構成されている。エレクトロニクスの概略図を図 2.6 に示す。

SDF:SDF は 256 本の PMT で光が大気蛍光かどうかの判定を行う作用を持ったモジュールであり、ファーストレベルトリガーとも呼ばれる。PMT アナログ信号を増幅させ、デジタル変換を行った後、SN 解析から PMT ごとの信号を判



図 2.4 BRM ステーションの外観と望遠鏡

定する。PMT からのアナログ信号を 12bit, 40MHz でサンプリングを行い，フラッシュ AD コンバーターでデジタル変換を行う。サンプリングされたデータは 4bin(100[ns]) 毎に積分され， $12.8\mu s$ 毎に記録される。記録されたデータ毎に S 比による SN 判定を行い，その判定結果を TF ボードに送信する。SDF ボード一枚には 16ch あり，それぞれ 1 本の PMT の判定をおこなうので，各カメラ毎に 16 枚の SDF が必要である。

TF:TF は 256 本の PMT で取得した光が空気シャワーのトラックであるか認識するモジュールでセカンドレベルトリガーとも呼ばれる。TF ボードはカメラ 1 台分の SDF ボードから得られる信号の中に，隣り合う 5 本以上の PMT(カメラの端の場合，3 本以上) から信号，もしくは高い信号閾値を超えた信号を出力した PMT

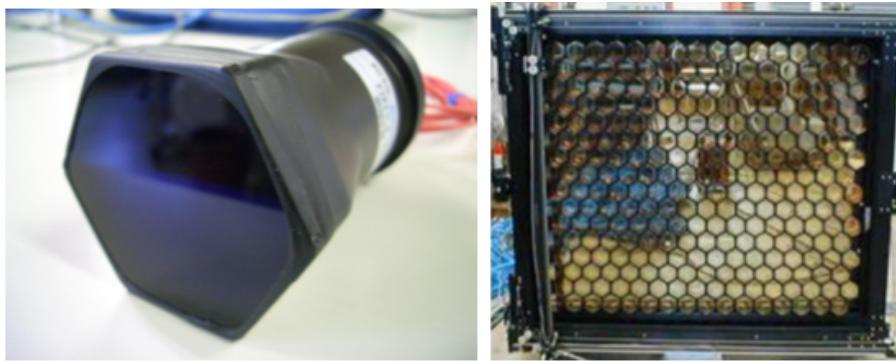


図 2.5 使用する PMT とカメラボックス

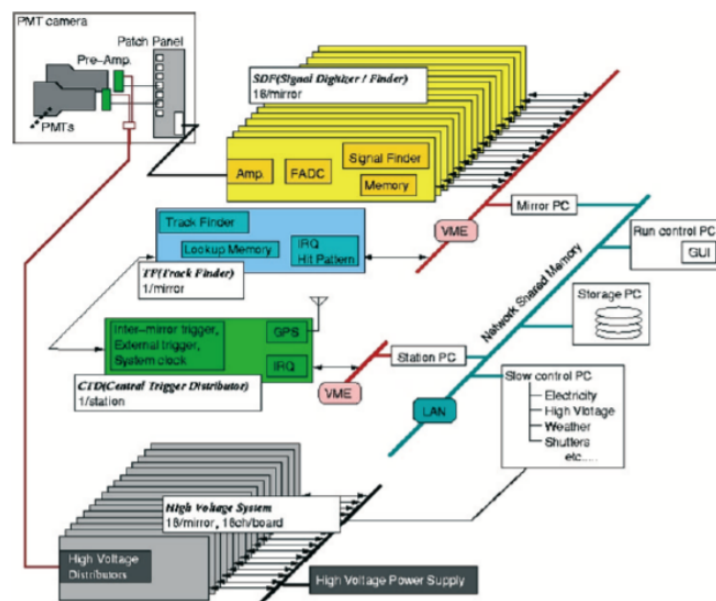


図 2.6 エレクトロニクスの概略図

が 1 本以上ある場合，飛跡信号やその候補があると判定し，その判定情報を CTD ボードに送信する．

CTD:CTD は最終的に取得すべきデータがあるかを判定するモジュールでファイナルトリガーとも呼ばれる．PMT カメラ毎の TF ボードからのトリガー情報を集め，PMT カメラ間にまたがる飛跡信号も含めた最終判定を行い，飛跡信号が会った場合データ取得信号を生成する．またステーション内，全ての大気蛍光望遠鏡を同期させるための初期化信号の生成も行う．

大気蛍光望遠鏡は空気シャワーからの大気蛍光を測定することで，その発光量や発達過程から 1 次宇宙線のエネルギーや空気シャワーの最大発達深さを知ることができる．

第3章

望遠鏡の較正

大気蛍光法での空気シャワー観測を行う上でエネルギーや到来方向の高精度な推定には望遠鏡の感度較正や大気の状態把握が重要になる。推定を高精度で行うには、PMTに入射した光子数、大気蛍光効率を考慮し大気中の空気シャワーの粒子数分布を算出しなければいけない。そのため、回路の応答や各部の増幅率、量子効率、光学系の反射率、透過率などをあらかじめ把握する必要がある。そこで、Telescope Arrayの宇宙線望遠鏡は様々な装置によって較正されている。

3.1 CRAYS

CRAYS(Calibration using RAYleigh Scattering)はレイリー散乱光を利用した絶対一様光源であり、標準PMTの較正を行う。CRAYSは窒素ガスを充填したチェンバーとN₂パルスレーザーからなる。レーザーの発光波長は337.1nmで光量は300 nJ、パルス幅は4 μ sである。レーザーエネルギーは放射パルス毎にエネルギーメーターでモニターされており、我々が使用しているレーザーではパルス毎の発光量のばらつきは $\pm 5\%$ であることが分かっている。PMTの視野中心がレーザーの光路と垂直になるようにPMTがセットされ、レーザー光のレイリー散乱のみを検出する。レイリー散乱断面積は既に測定されており、理論計算値ともよく一致しているためレーザーの出力を測定することで散乱光量がわかる。1台の望遠鏡あたり3本取り付けられている標準PMTの量子効率、収集効率の測定を行っている。CRAYSの様子を図3.1に示す。

3.2 YAP

YAP(Yttrium Aluminum Perovskite) は CRAYS によって較正された標準 PMT の光電面中心に貼付されている絶対光量光源であり、観測中の絶対ゲインをモニターするために用いられる。YAP は YAIO₃:Ce シンチレーターを窓とする直径 4mm、高さ 1mm の円筒容器内に、²⁴¹Am α 線源を入射粒子として封入したものである。ピーク波長は 370nm、パルス幅は約 20ns、PMT 光電面で発生する光電子数は約 450 個で、パルス毎のばらつきは $\pm 5\%$ である。CRAYS を使った PMT のゲイン測定の際に、同時にその PMT に貼付されている YAP の光量の絶対値も CRAYS の光量との比較によって測定されている。図 3.2 に YAP の概観を示す。

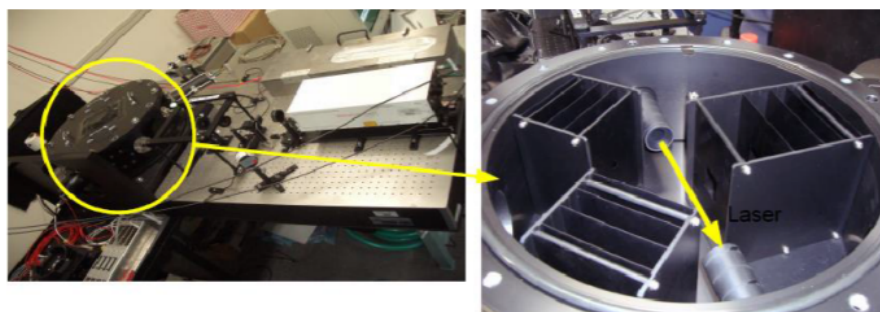


図 3.1 CRAYS の様子

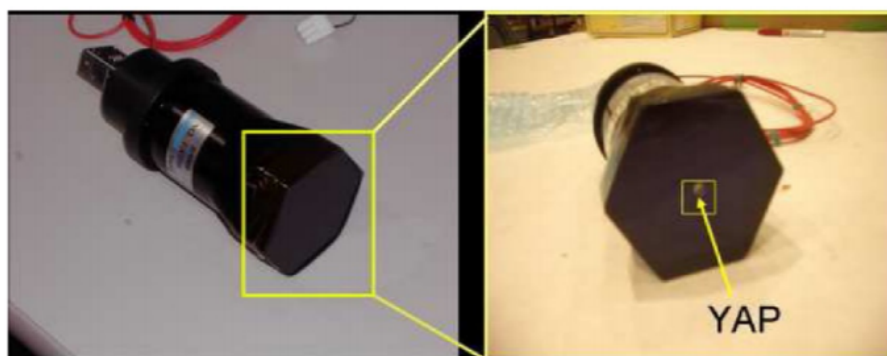


図 3.2 YAP の概観

3.3 Xeフラッシャー

XeフラッシャーはFDの複合球面鏡中心に取り付けられた一様光源であり、PMTカメラから約3m離れた球面鏡の中心からPMTカメラ面に一様な光を照射してPMTのモニターおよびゲイン調整を行う。PMT増幅率と印加電圧との関係が明らかになっている標準PMTを基準とし、残りの全てのPMTのゲインは揃えられる。一様パルス光源でPMTカメラ全体を照らし、同一のパルス光に対してすべてのPMTが同じレスポンスをするように基準PMT以外のPMTの印加電圧を調整する。Xeフラッシャーは外部トリガーで制御されており、パルス幅 $2\mu s$ 、光量 $2 \times 10^4 pe$ のパルス光を25Hzで発射する。照射のイメージを図3.3に示す。PMTカメラ面における光量一様性からのばらつきは2%である。相対ゲインの調整つまり印加電圧の変更は年3回程度の頻度で行われている。通常はこの光源を用いて観測中1時間に1回の頻度でPMTのモニターが行われている。

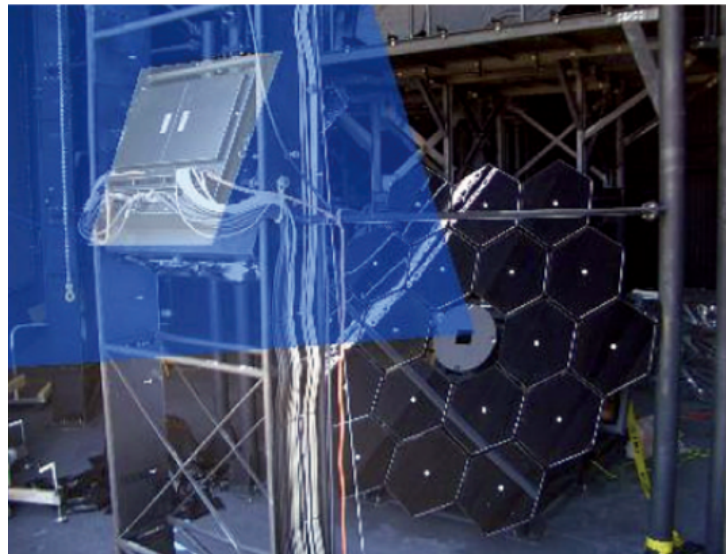


図 3.3 Xeフラッシャーの照射イメージ

3.4 UV-LED パルサー

UV-LEDパルサーモジュールはPMTカメラのゲイン較正に用いられる。較正はUV-LEDパルサーモジュールを複合球面鏡中心にある穴にマウントして行う。マウント方法は、ON/OFFが可能な磁石で固定し、さらにCクランプで固定す

る。マウントには取り外し可能な 521mm の長さの Extention があり, PMT カメラとの距離を 2 種類で設定可能である。モジュールの概観を図 3.4 に示す。

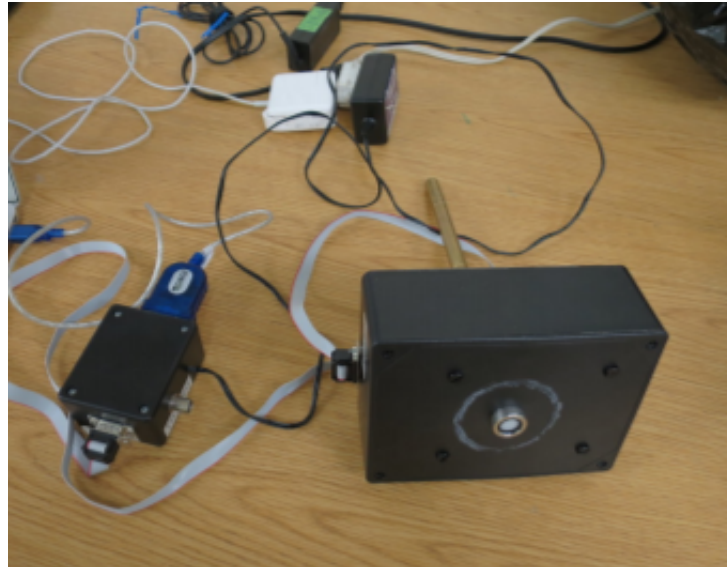


図 3.4 UV-LED パルサー

3.5 大気モニター

空気シャワーによって生成された大気蛍光は大気中を伝播する際に, 大気中の微粒子によって散乱・吸収される。この散乱・吸収量を知る必要がある。

3.5.1 Central Laser Facility

CLF(Central Laser Facility) は TA 観測サイトの中心,3 つのステーションから等距離に設置され, 大気透明度の測定に用いられる。YAG レーザー (355nm) を垂直上方に射出し, 上方での側方散乱光を標準光源として 3 ヶ所の FD ステーションで観測する。この側方散乱を観測した結果を解析することで, ミー散乱の消散係数を求めることができる。レイリー散乱による散乱量は計算によって求めることができるので, 計算で求めたレイリー散乱量と実際に観測された光量との差がミー散乱による散乱量を表すことになる。ここからミー散乱の消散係数 α_{mie} を求め, 大気状態が高さにのみ依存すると考えた場合には LIDAR によって得られたミー散乱の消散係数と比較することが可能である。現在 CLF は 観測中, 30 分毎に運用され, FD で観測されている。TA 観測サイトの中央に設置された CLF とレー

ザーの様子を図 3.5 に示す.



図 3.5 CLF の外観と使用する光学系

3.6 天候モニタリング

解析には雲量の把握も重要になる. TA 実験では魚眼レンズを取り付けた CCD カメラを用いて, 雲の有無を判定している. 撮影した空の写真から星を探し, 見えている星の割合が少なければ天候が悪いと判断する. その他観測を行うかの決定もこのシステムを参考にする. CCD カメラの概観と撮影した写真を図 3.6 に示す.

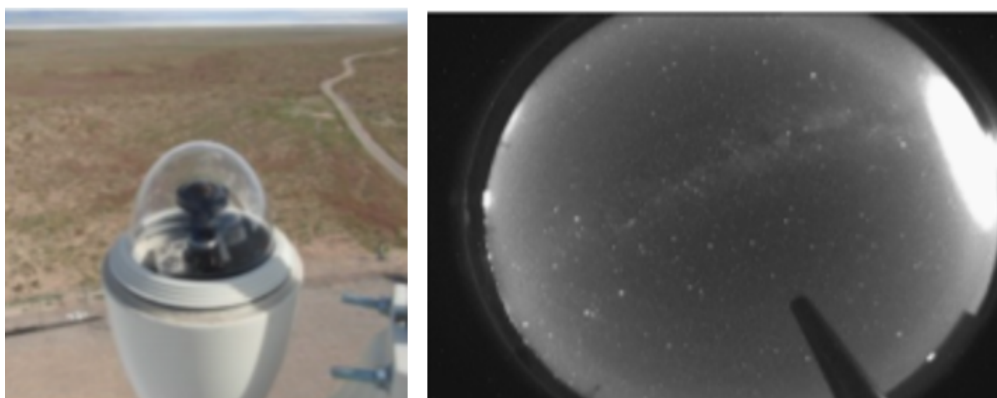


図 3.6 天候モニタリング用魚眼 CCD

第4章

飛行型標準光源

4.1 Opt-copter

TelescopeArray で使用している宇宙線望遠鏡の較正を行う新たな装置として、ドローン搭載型の標準光源を開発している。この飛行型標準光源を我々は「Optics(光学)」と「Octocopter(8枚羽のマルチコプター)」から「Opt-copter」と呼んでいる。Opt-copter の特徴は位置が正確にわかる光源を望遠鏡の視野内に任意に設置できることである。ドローンに標準光源と測位 GPS を搭載した装置であり、宇宙線が引き起こす大気蛍光の代わりにこの装置、位置が正確にわかる光を観測することで望遠鏡の視野方向のズレをはじめとした様々な光学特性を把握することができる。Opt-copter を図 4.1 に示す。



図 4.1 Opt-copter

4.2 UAV Unmanned Aerial Vehicle

UAV は S1000+(DJI 社) を用いる。S1000+ の総重量は約 4kg, 最大過積載重量は機体を含めて最大 11kg, 飛行時間は 17000mAh の 6 セル LiPo バッテリー使用時に約 15 分間である。約 110cm の円周上に 8 つのモーターが配置されている。送信機による手動での操縦の他に, GPS 座標や高度などを設定することで自動飛行も可能である。全 8 本のフレームはカーボン素材でできているため軽く, 折りたたむことができるため可搬性能が高い。また, 飛行時は離着陸時に接地する脚が上がるため光源の邪魔にならないなど, 飛行型校正装置として適した UAV である。光源の取り付け場所は本体下の中心となる。以下 S1000+ の基本仕様と飛行性能である。

機体本体

機体全長 (水平寸法) : 1,045mm、総重量 : 4,200g

ローターフレームアーム

アーム長 : 386mm、重量 : 325g (モーター、アンプ、プロペラ含む)

リタラクティブランディングギアサイズ

ギアサイズ : 460 × 511 × 350mm、重量 : 1,330g (センターフレーム重量)

モーター&アンプ

サイズ : 41.0 × 14.0mm、重量 : 158g (冷却ファン含む)

最大出力 : 500W、KV 値 400rpm/V

電流 : 40A、対応バッテリー : 6S Lipo、周波数 : 30Hz~450Hz、重量 : 35g

プロペラ

サイズ : 15 × 5.2 インチ、重量 : 13g × 8

素材 : 高強度エンジニアリングプラスチック

飛行性能

フライト時重量 : 6.0~11.0kg

推奨バッテリー : 6s715,000mAh~20,000mAh 15C 以上

最大消費電力 : 4,000W

ホバリング時消費電力 : 1,500W (*離陸重量 9.5kg 時)

飛行時間 : 最大 18 分 (20,000mAh バッテリー利用、離陸重量 9.5kg 時)

A3 flight controller を搭載し, これにより自身の制御を行っている。ホバリング精度は垂直方向に ± 0.25m, 水平方向に ± 0.75m である。UAV の位置は磁気探知機と気圧高度計センサー, GPS(Global Positioning System) 慣性計測装置に

よって測位されている。制御用の GPS は一般的なものを用いているため GPS 座標の誤差は 2m から 3m、高度の誤差は 10m ほど生じると考えられるが、他のデバイスによって位置安定化補正が行われ、高い精度での飛行が可能である。アプリケーション GroundStation を用いることで GPS 座標や高度、機首方向、速度など詳細に設定した自動飛行が可能である。Opt-copter との通信が途切れた場合でも Opt-copter は予め設定したプログラムを実行し、完了させる。また、手動飛行時に Opt-copter との通信が 10 秒間途切れた場合、Opt-copter は離陸した地点を正確に探し出し、最も安全なルートと高度で帰還する。その後、離陸した地点上をホバリングする。また、操縦者は危険を察知した場合、Opt-copter に帰還を命令すると進行中のプログラムを中断し、離陸地点へと帰還させることもできる。

4.3 光源

搭載される光源は一様性と安定性が要求される。さらに軽量であることも重要である。一様性が要求されるのは FD 視野内での Opt-copter の位置と姿勢に依存させないためである。安定性は FD の校正に直接影響し、また軽量化が要求されるのは、Opt-copter の飛行時間は積載量に依存するためである。光源は回転させた場合少なくとも 10° から 20° で均一であるべきである。光源には球体に近似した性能を持たせるために正 12 面体の各面上に LED を搭載したものを使用する。また、一様性を高めるために光源の周りはディフューザーで覆われている。光源の様子を図 4.2 に示す。

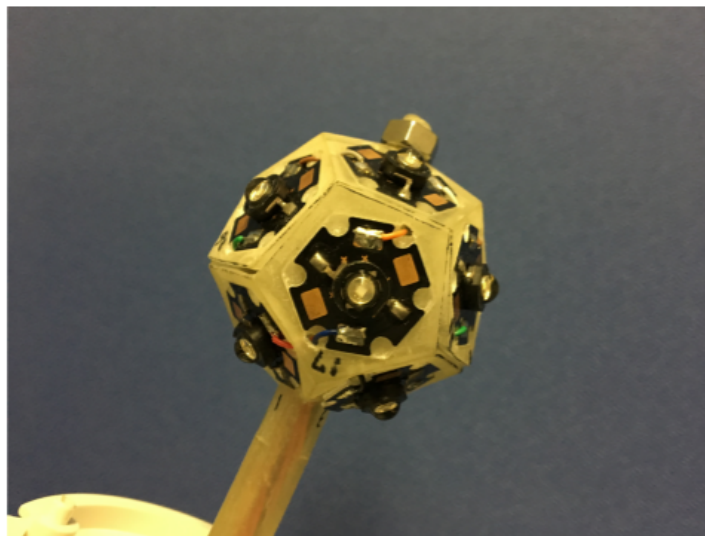


図 4.2 12 面体光源

4.3.1 LED

LED は Roithner Laser Technik 社 H2A1-H375 を用いている。LED の外観を図 4.3 に示す。波長は 375nm, 発光量は調整可能で, 発光タイミングは GPS による PPS と同期しており, 10 μ sec のパルス幅で発光する。LED はランバート・シリコンレンズで覆われており, 130° の半値全幅と対称の放射パターンを持つ。



図 4.3 使用している LED

4.3.2 ディフューザー

ディフューザーは光源の一様性を向上させるために必要で, 球体が望ましい。また, UAV に搭載可能な大きさでなければならない。Opt-copter では市販されている照明に付属している外装をディフューザーとして用いる。ディフューザーの外観を図 4.4 に示す。ディフューザーの材質はシリコンであるため, 柔軟で, 輸送時に破損する可能性が低い。大きさは半径 70mm となる。またディフューザーの透過率拡散率も一様であることが望ましい。

4.4 測位用 GPS モジュール

Opt-copter の位置情報を高精度で得るためにドローン制御用の GPS モジュールとは別に, Swift Navigation 社製 Piksi を搭載する。Piksi を図 4.5 に示す。この GPS モジュールは Real Time Kinematic(RTK) 測位を利用して測位を行



図 4.4 使用しているデュフューザー

う。RTK 測位では複数台の GPS モジュールを用い、それぞれが衛星から電波を受信、そして GPS モジュールがお互いに受信したデータや計算結果などを送受信することで高精度に複数のモジュール間の相対位置が取得できるというものである。使用したモジュールを図 4.3 に示す。

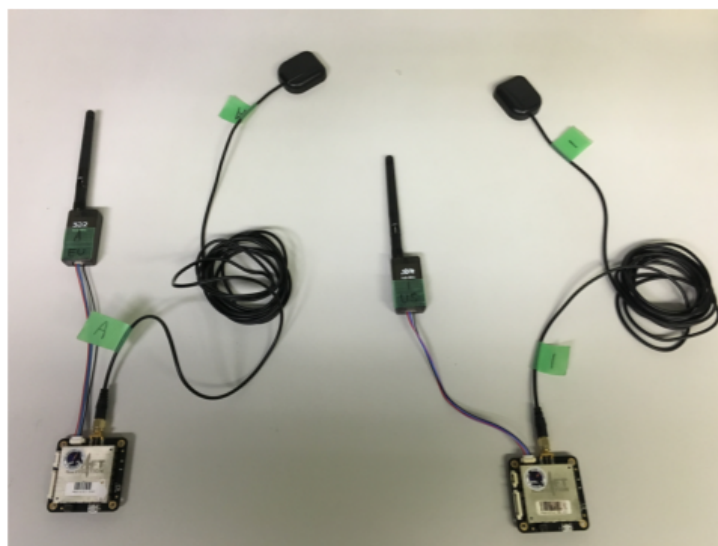


図 4.5 RTK-GPS モジュール Piksi

Opt-copter では 2 つのモジュールを 1 つの組み合わせとして使用する。片方を基準局として固定し、もう片方を移動局とする。2 つのモジュール間は 10Hz で通信を行い、数 cm の誤差でモジュール間の相対的な距離測定を可能にする。RTKGPS は基地局と移動局と関係を相対的に記録するモジュールであるため、基

地局 GPS モジュールを既知点に設置して使用する。Opt-copter で使用する場合、基地局は FD ステーションにある正確に測位されたモニュメント上に設置し、測定を行う。Piksi を使用する際には、はじめに較正を行わなければならない。較正は基地局と移動局を数 cm 程度まで近づけた状態で行い、10 分から 60 分で完了する。その後、移動局は目的位置まで移動し、2 点間の相対的な位置情報を記録する。基地局側のモジュールはパソコンに接続し、アプリケーション Piksi Console を用いて較正及びデータ取得を行う。取得されたデータにはタイムスタンプが押されるがこの時刻は UTC と違いうるう秒の補正がされていないため、2019 年現在は GPStime と UTC で 18 秒の差が存在する。

第5章

測位用 GPS モジュール精度評価試験

5.1 試験目的

現在 Opt-copter は望遠鏡の視野角にして 0.1° 刻みでの角度較正を目標としている。光源と望遠鏡の位置が離れば離れるほど角度に対する領域は広がるので、光源の測位に要求される精度は低下する。Opt-copter は法律や通信等の制限により望遠鏡の約 300m 先を飛行させる。300m 離れたときに望遠鏡の視野角度 0.1° が持つ幅は約 50cm ほどである。測位用の GPS モジュールがこの条件を満たしているか確認することを試験の目的とした。また、GPS の精度は「正確度」と「精密度」の2つに大きく分けて考えられる。正確度とは測定値が実際の値とどれほど近いかを表し、精密度とは複数回行った測定のそれぞれの測定値が互いにどれほど近いかを表す。今回の試験ではそれらの指標となる系統誤差、統計誤差を把握するために複数回の GPS アンテナ移動、複数回の試験を行った。

5.2 試験概要

Opt-copter の測位に用いる GPS モジュール Piksi の移動局アンテナを同じ距離往復移動させることを繰り返した。試験は以下の手順で行った。

1. 基準局 GPS アンテナと移動局 GPS アンテナを最も近くなるように設置する。これを基準位置とする。
2. 移動局 GPS アンテナの移動距離を決め、移動先位置を決定する。
3. 約 90 分間 Piksi のキャリブレーションを行う。

4. 移動局 GPS アンテナを 2. で決めた移動先に移動させる.
5. 5 分間データを取得する.
6. 移動局 GPS アンテナを 1. で決めた基準位置に戻す.
7. 5 分間データを取得する.
8. 4～7 を繰り返す.

試験は信州大学工学部情報棟の屋上で行い，1 回の試験で約 10 往復の移動を行った．また移動は東西の水平移動，南北の水平移動，垂直な移動の 3 種に分けて行った．その他に，GPS 衛星からの信号が床で反射し下から入射しないようアルミパネルが取り付けられているため基準位置でも距離は 0 にはならない．水平移動試験では光学実験に用いられるレールを，垂直移動試験ではエレベーター式の可動 3 脚を用いた．どちらも基準位置，移動先でしっかりと止まるようになっている．東西移動試験の様子を図 5.1，図 5.2 に，南北移動試験の様子を図 5.3，垂直移動試験の様子を図 5.4 に示す．また，それぞれの試験での GPS アンテナを移動させた距離，往復させた回数を表に示す．

	移動距離	往復回数
東西	60cm	50 回
南北	60cm	19 回
高さ	28cm	52 回

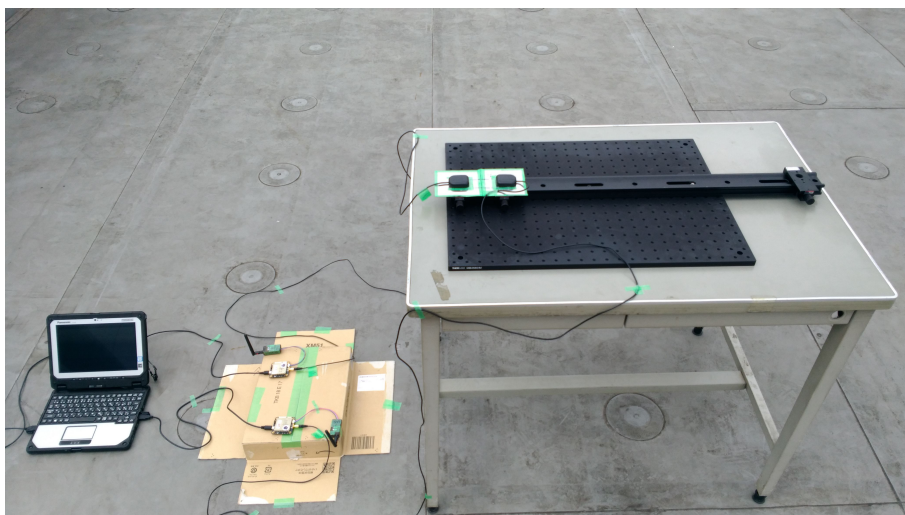


図 5.1 東西移動試験



図 5.2 東西移動距離

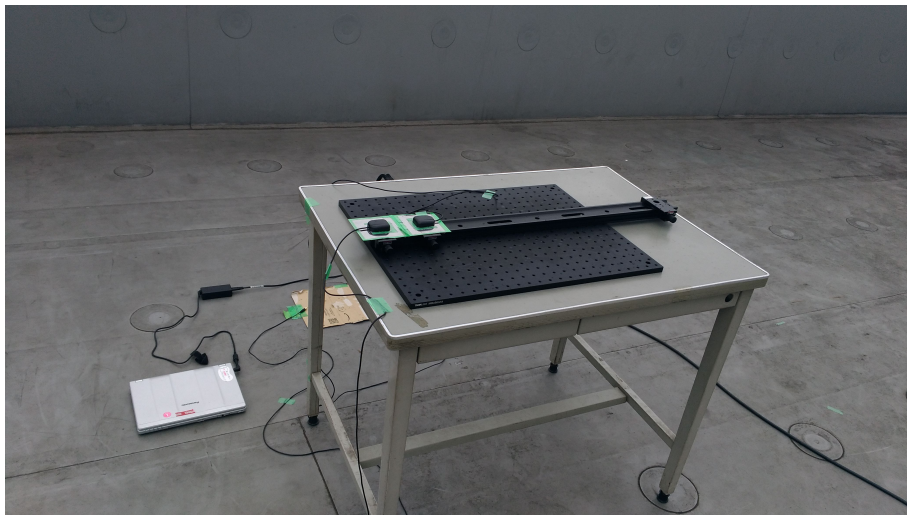


図 5.3 南北移動試験



図 5.4 垂直移動試験

5.3 試験で得られた GPS モジュールの記録と分析

GPS モジュールが記録するのは、GPS 時間、2つのアンテナの南北の距離、東西の距離、高さの差、認識している GPS 衛星の数や緯度経度高度速度など多岐にわたる。その中で、今回分析に使用するデータは東西の距離、南北の距離、高さの差の3つのパラメータである。例として、東西での水平移動試験1回の試験結果をグラフに表したものを、アンテナの移動開始部分に焦点を当てたものを図5.5に示す。これはGPSモジュールを設置、起動し90分間のキャリブレーションの後に10回の往復移動を行っている様子である。

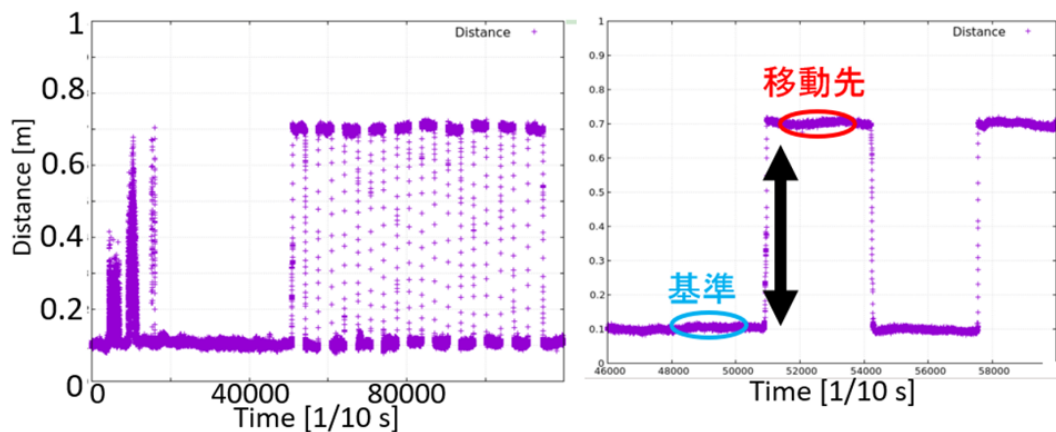


図 5.5 東西試験で得られたアンテナ間距離

GPS モジュールが記録を行う頻度は1秒間に10回であり、5分間のデータ取得で3000個の数値が記録される。GPS アンテナの移動は手動で行っているのので、図の赤い丸で囲った部分のように移動前後の約300データずつを省いた2400データを分析に使用している。同様に図の青い丸で囲った移動を始める前の部分で2400データを用いこの平均を基準位置でのアンテナ間距離の基準値とした。この試験での基準値は9.96cmである。移動先で記録された距離から基準値を引くと移動量が求められるので真の移動量60cmと比較できる。

具体的な分析では、まず 10 回の移動先でそれぞれの距離の平均値と標準偏差を求め、移動によるばらつきの変化を確認するため基準位置での 11 回の標準偏差の遷移をグラフに表した。これを図 5.6 に示す。ばらつきは平均値、標準偏差ともに最大 1 cm 程度である。

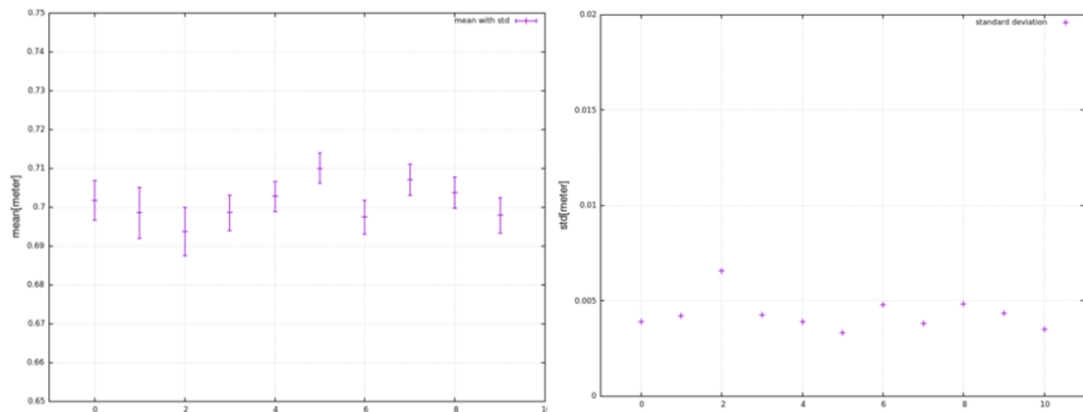


図 5.6 移動先での距離の平均, 標準偏差の推移

同様に東西移動試験の 50 往復全てに対して距離の平均値と標準偏差を求めた。また、各試験での基準値と真の移動距離を各移動先の距離から引くことで真値からのズレである誤差が求められる。同様に基準位置でも基準値を引くと誤差が求められる。この誤差をグラフに表したものを、ヒストグラムに表したものを図 5.7 に示す。50 個の誤差の標準偏差は基準位置と移動先でそれぞれ 0.117cm, 0.165cm だった。さらに、変化を確認するために全ての基準位置での標準偏差をグラフに表したものを、ヒストグラムに表したものを図 5.8 に示す。東西移動試験の全てで標準偏差は 1cm 未満であった。これらから移動や電源を入れなおすことによる影響は少ないと考え 50 往復をまとめて整理することにした。東西移動試験での移動開始後のすべてのデータで誤差を求めそれをヒストグラムに表した。これを図 5.14 に示す。同様の手順で南北、垂直移動でも分析を行った。南北移動試験でのヒストグラムを図 5.15, 垂直移動試験でのヒストグラムを図 5.16 に示す。青が基準位置, 赤が移動先での誤差である。使用したデータの数はそれぞれ往復回数*2400 である。

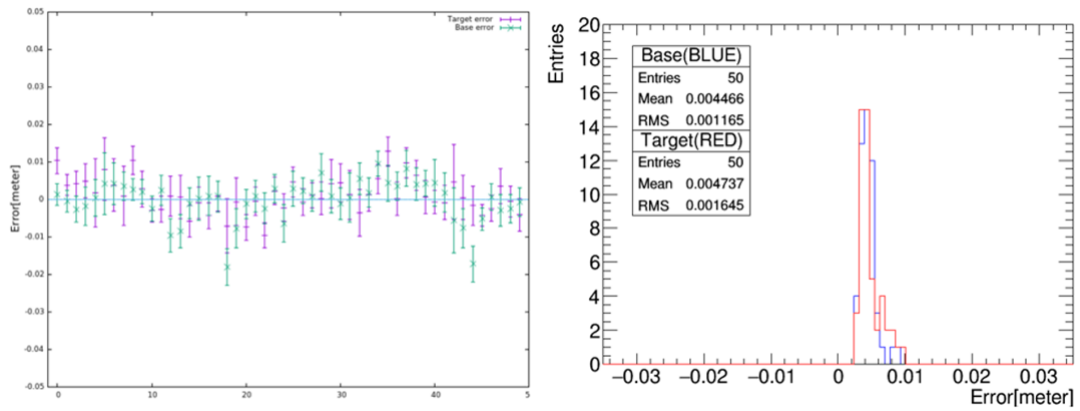


図 5.7 誤差の平均とヒストグラム (50 往復)

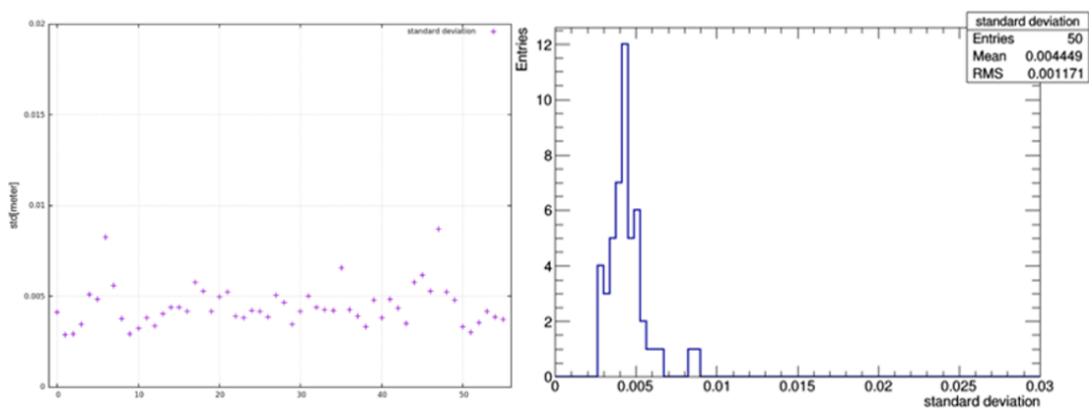


図 5.8 50 往復の基準位置での標準偏差

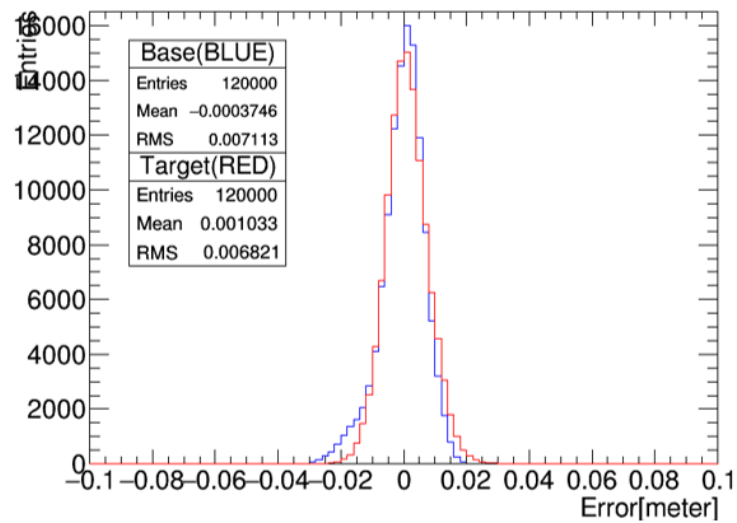


図 5.9 東西移動試験でのすべての誤差

5.4 結果

結果として各試験での移動先での誤差の平均と標準偏差を表に示す。誤差が正確度の指標である系統誤差，標準偏差が精密度の指標である統計誤差にあたる。各方向に分かれた結果をまとめると GPS モジュール Piksi の系統誤差は 0.71cm, 統計誤差は 1.18cm となった。Opt-copter で使用する測位用の GPS モジュール Piksi の精度を把握するため，移動局アンテナの往復移動を繰り返す試験を行った。得られた記録と真の移動距離を比較し正確度を，記録のばらつき具合から精密度を求めた。ここから，Opt-copter の求める精度を満たしていることが確認できた。また，移動を繰り返しても GPS モジュールを再起動しても記録に大きな変化は無いことがわかり，Opt-copter の違うフライトでも問題なく動作することが確認できた。今回の試験は短い距離で行ったが今後長い距離でも同様の結果となるか確かめることが求められる。

	真値との差	標準偏差
東西	0.103cm	0.682cm
南北	0.364cm	1.01cm
高さ	0.604cm	1.86cm

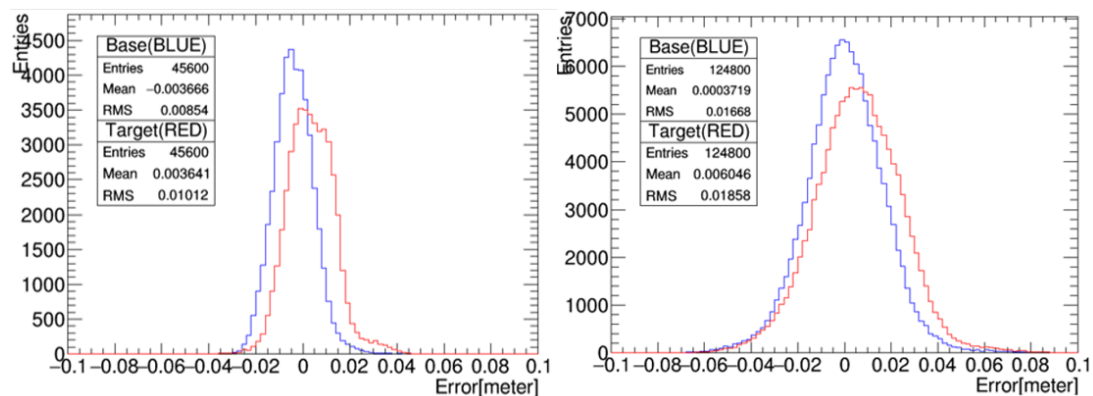


図 5.10 南北，垂直移動試験でのすべての誤差

第6章

Telescope Array 実験サイトでの Opt-copter 観測

Opt-copter による FD の較正を行うため、実際に Opt-copter を現地に運び、Telescope Array 実験サイトで Opt-copter のフライトと FD による観測を行った。本試験の目的は主に、FD の光学特性を解析可能なデータの取得である。

6.1 試験概要

場所 : TA 観測サイト (BRM ステーション)

風速 : 5m/s 以下

飛行速度 : 1m/s

Opt-copter の位置記録頻度 : 10Hz

光源の発光頻度 : 10Hz

FD による撮影頻度 : 10Hz

対象 FD : FD00~FD11

距離 : 各 FD ミラー中心より 300m 付近

試験は TA 実験の 3 つの FD ステーションのうち BRM ステーションの FD12 台を対象に行った。Opt-copter のフライトと FD での観測試験を行えるのは、天候が良好な月の無い夜間である。さらに、安全を考慮し風速 5m/s 以下の場合に限る。

6.2 離着陸ポイントと飛行区域

図 6.1 に TA 観測サイト (BRM ステーション) の俯瞰図を示す。フライトは BRM の位置が正確に測定された既知点 (サーベイマーカー) 付近から行われ、FD00~05 までの FD (左視野) をターゲットにフライトする場合は南側のサーベイマーカーを、FD06~11 までの FD (右視野) をターゲットにフライトする場合は北側のサーベイマーカーを使用する。実験準備が完了した状態の離着陸ポイント付近の様子を図 6.2 に示す。測位用 GPS モジュールの基準局アンテナはサーベイマーカーの上に設置され、移動局との相互通信用アンテナは通信確保のためラダーの上に設置される。Opt-copter は離陸用のパッドから飛行し、指定した区域を飛行後、着陸用パッドに着陸させる。飛行中、Opt-copter の位置は 10Hz で記録され、光源も 10Hz で発光し続ける。その光は同タイミングで、トリガーモジュールによって制御された FD によって撮影される。

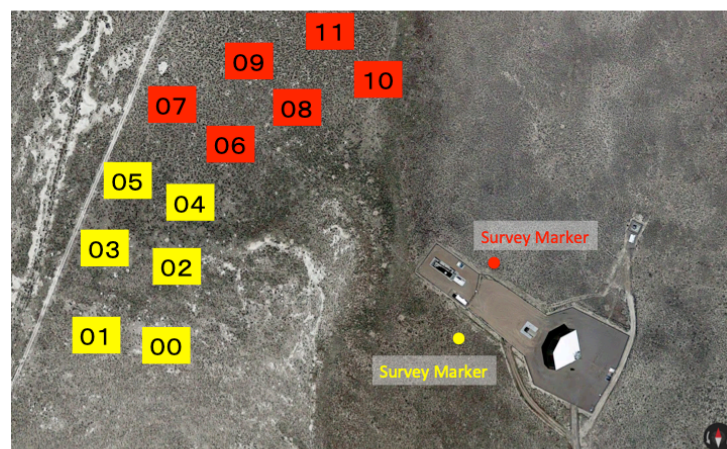


図 6.1 TA 観測サイト (BRM) の俯瞰図。2 つの点はサーベイマーカー、0~11 の数字は各 FD に対する飛行位置

6.3 フライトプランと取得記録

離着陸時は手動操作を行い、それ以外は事前に設定したプラン通りの自動飛行に切り替える。1 フライトは 15 分程度で、フライトの種類ごとに各 FD に対して数



図 6.2 Opt-copter の離着陸ポイント

回ずつ観測を行う。フライトの種類は FD の視野中心付近を狙ったもの、視野端を狙ったもの、各 FD 視野を横切っていくものなどがある。それぞれ、FD の視野方向、コマ収差、FD ごとの違いなどの解析を意図したものとなっている。各 FD の視野上でどのような動きをするか計画したフライトプランを図 6.3 に示す。ここに示された軌跡を描くようにフライトさせる。実際の Opt-copter の位置は、サーベイマーカーからの相対的な東西の距離、南北の距離、高さとして記録される。比較のため各 FD からの見かけの仰角、方位角に変換したものを図 6.4 に示す。12 台分の記録をまとめたものを図 8.6 に示す。フライトプランと実際の記録を比較すると、概ね狙い通りのフライトになっていることが確認できた。受光側の記録例として図 6.6 にある時刻の、信号が記録されたいくつかの PMT の出力を示す。光が入っていると出力電圧が上昇し、その出力電圧を Analog Digital Converter によって変換し ADC 値として記録している。これらの、Opt-copter の位置記録、FD の受光記録を用いて FD の光学特性について解析を行う。

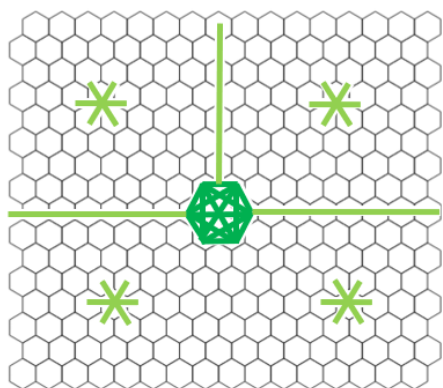


図 6.3 FD 視野とフライトプラン

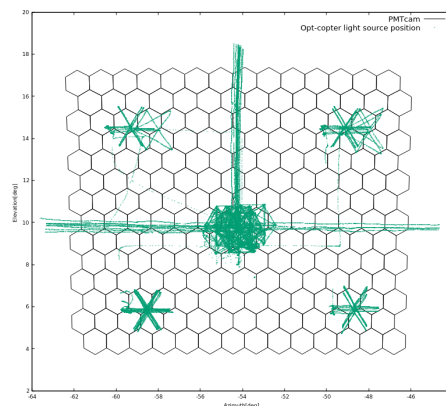


図 6.4 FD 視野と飛行記録

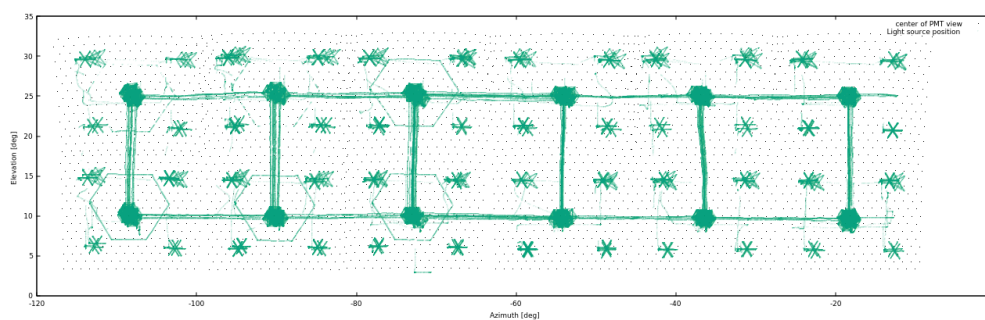


図 6.5 FD12 台分の視野と飛行記録

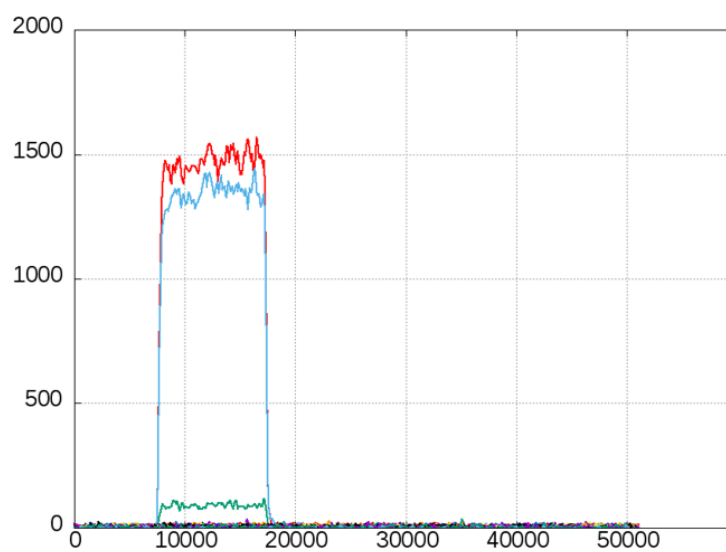


図 6.6 PMT の出力

第7章

FDの総受光量分布から得た PMTの輪郭探索による視野方向 解析

本論文で述べる解析はFDの視野方向について確認したものである。解析に用いる語句とその意味を示す。

光源位置 : 測位用GPSが記録したOpt-copterの光源位置

記録受光量 : 反応した各PMTごとの、記録されたADC値の積分

総受光量 : 反応した全PMTの記録受光量を足し合わせたもの

受光量重心 : 反応したPMTの中心座標と記録受光量により算出された重心座標

スポットサイズ : 鏡によって集められた光がPMTカメラ上で持つ像の大きさ

7.1 PMT境界での総受光量の減少と視野方向解析手法

解析を行うに当たり視野上に投影した各光源位置に対して、同時刻のFDが記録していた総受光量で色を付けた。これを図7.1に示す。縦軸が視野の仰角、横軸は方位角を表している。この記録を確認すると総受光量の大きい部分、小さい部分があることがわかる。特に偏りがわかりやすいFD07の記録を拡大し、図7.2に示す。ここには、TA実験グループが現状で想定しているPMT群の配置も重ねて表示している。図7.2を確認すると、PMT同士の境界にあたる部分付近で総受光量が減少していることがわかった。これは図7.3に示すイメージのように、PMT同士の境界に光が結像するようOpt-copterが飛行しているとき、境界部分に入る光

が記録されないためだと考えた。特に、中央に位置するPMT付近では各辺で受光量の減少が確認でき、青い六角形=PMTの輪郭がはっきりと表れている。解析にはこの表れたPMTの輪郭を利用する。さらに図7.2をよく確認すると、我々が想定していたPMTの輪郭と、表れたPMTの輪郭が少しずれて存在していることがわかる。受光量の減少は実際のPMT境界が位置している部分で起こると考えられ、表れたPMTの位置こそが、実際のPMTの存在する位置であるといえる。この2種類のPMTの位置の差を定量的に見積もることでFDの視野方向が正しく把握できる。データ量の問題や、コマ収差の影響を考え解析はPMTカメラの中央付近に位置するPMT119番のみを対象として行った。

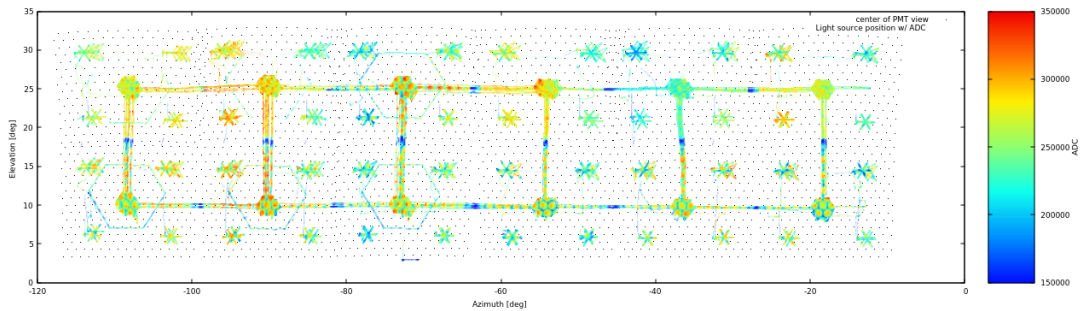


図 7.1 全FDの視野とOpt-copterの飛行記録(総受光量で色分け)

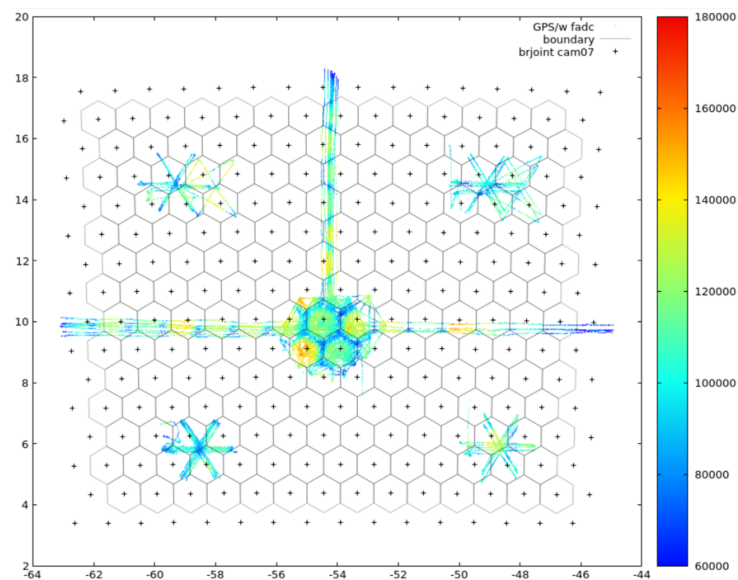


図 7.2 FD07の視野とOpt-copterの飛行記録(総受光量で色分け)

7.1.1 光源位置と総受光量の補間生成

なお観測によって得られた飛行記録は密度が低く、均一に分布していない。解析を簡単にするためFD視野の中央部分で、格子状の点として推測される光源位置とそれに対応する記録受光量を補間生成した。各FD視野中心の元記録と補間後記録を図7.4, 図7.5から図7.26, 図7.27に示す。光源位置は仰角方位角それぞれの方向に 0.01° 刻みで均一に生成される。対応する総受光量は元データの重み付き平均によって算出され、重み W は式7.1によって与えられる。 dx と dy は元の光源位置座標と各生成座標との距離である。

$$W = \frac{1}{dx^4 + dy^4} \quad (7.1)$$

以下の解析には生成後のデータを用いている。

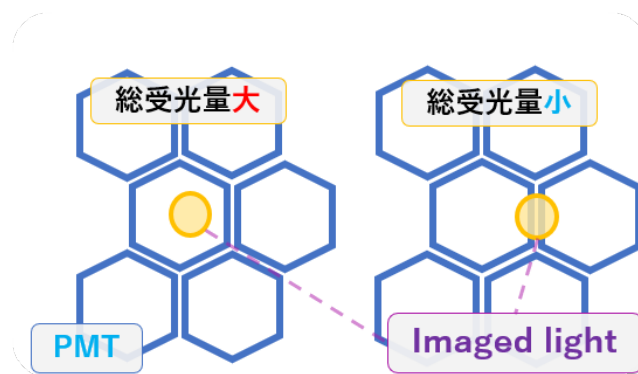


図7.3 PMT境界における総受光量の減少

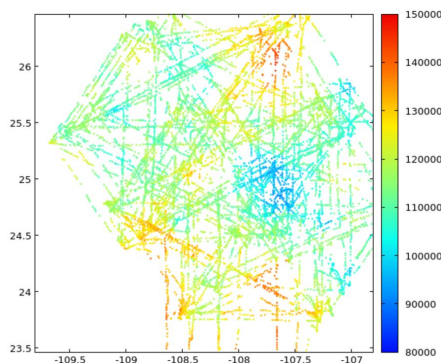


図7.4 FD00：オリジナル

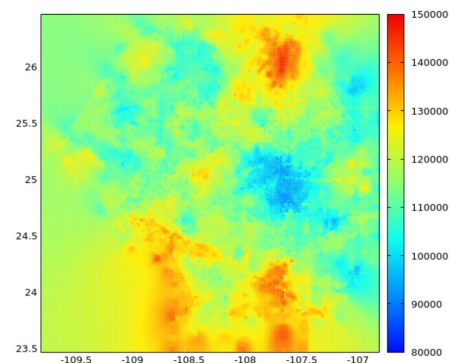


図7.5 FD00：補間後

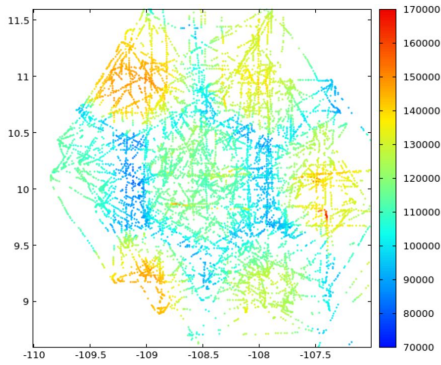


図 7.6 FD01：オリジナル

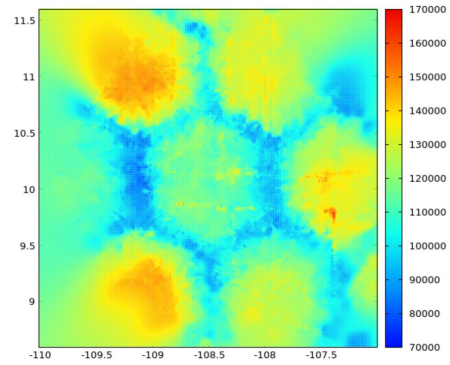


図 7.7 FD01：補間後

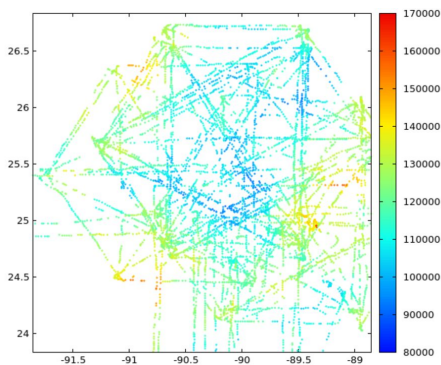


図 7.8 FD02：オリジナル

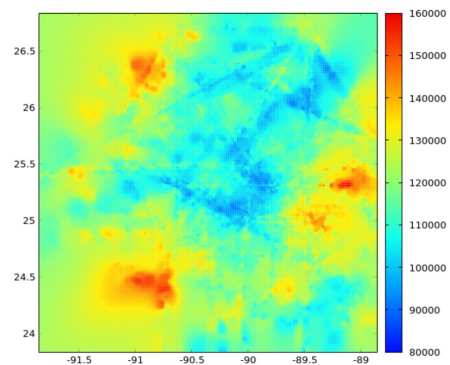


図 7.9 FD02：補間後

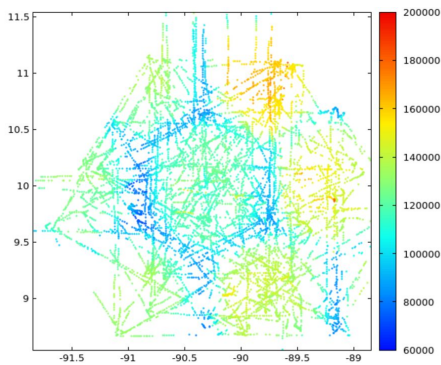


図 7.10 FD03：オリジナル

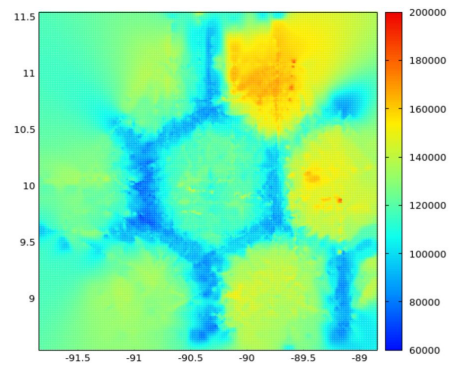


図 7.11 FD03：補間後

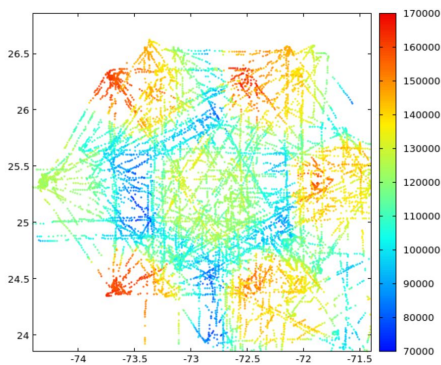


図 7.12 FD04：オリジナル

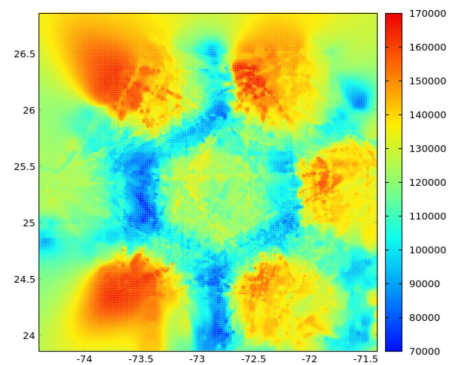


図 7.13 FD04：補間後

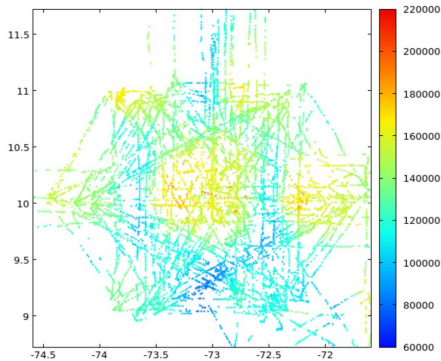


図 7.14 FD05 : オリジナル

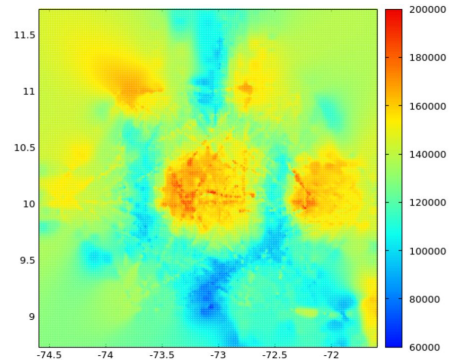


図 7.15 FD05 : 補間後

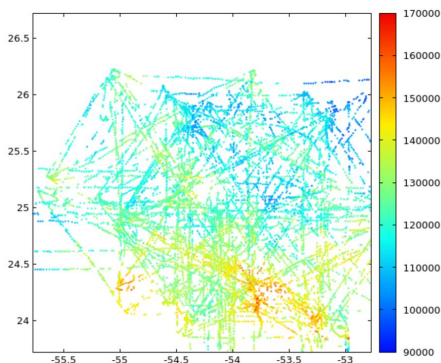


図 7.16 FD06 : オリジナル

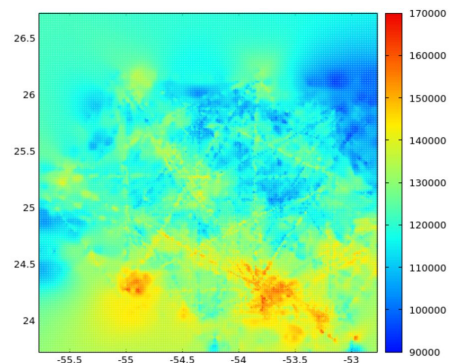


図 7.17 FD06 : 補間後

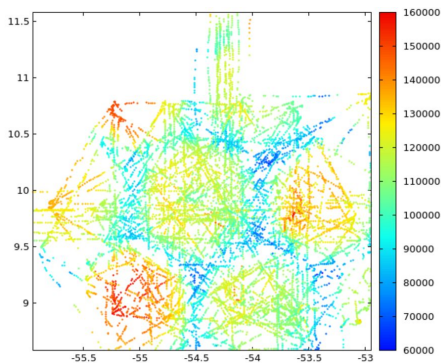


図 7.18 FD07 : オリジナル

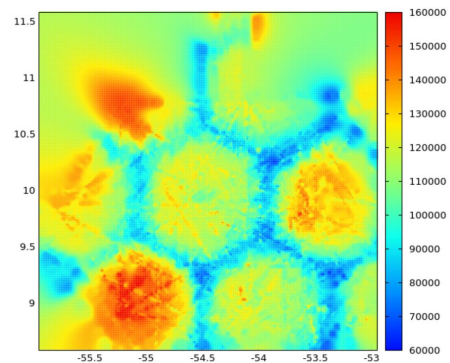


図 7.19 FD07 : 補間後

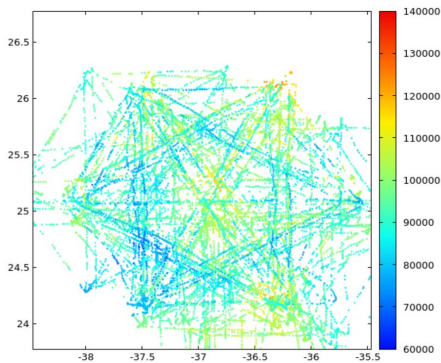


図 7.20 FD08 : オリジナル

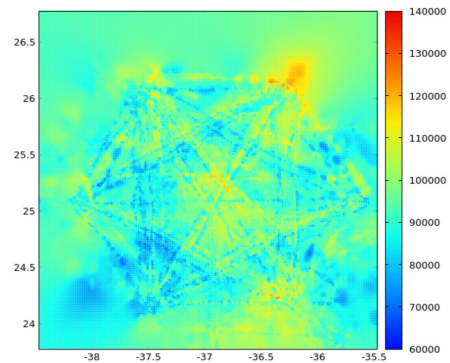


図 7.21 FD08 : 補間後

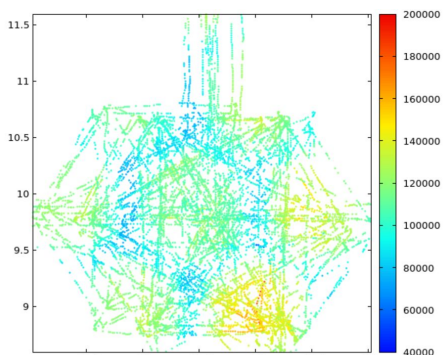


図 7.22 FD09 : オリジナル

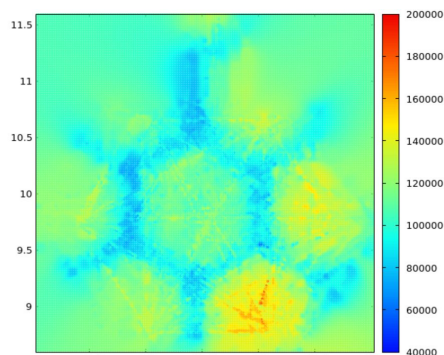


図 7.23 FD09 : 補間後

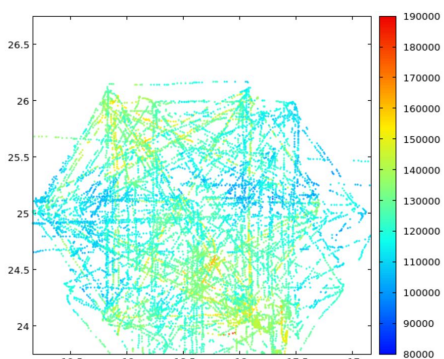


図 7.24 FD10 : オリジナル

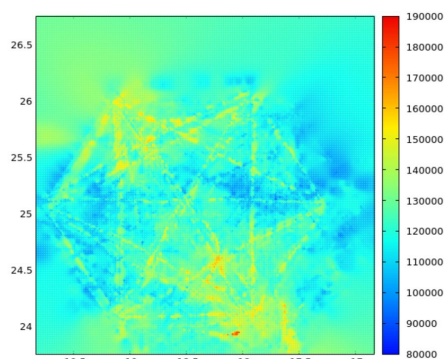


図 7.25 FD10 : 補間後

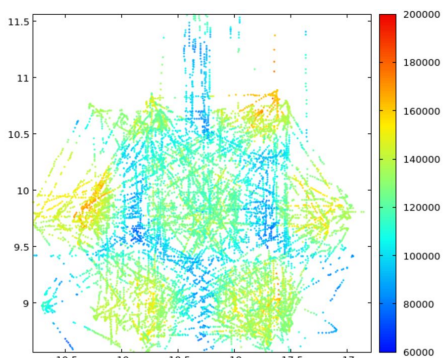


図 7.26 FD11 : オリジナル

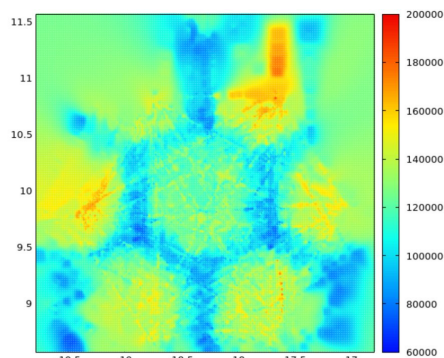


図 7.27 FD11 : 補間後

7.1.2 PMTの輪郭とスポットサイズの関係

図7.4～図7.26の全FD分の視野中心を改めて確認すると、FD01, FD03, FD04, FD05, FD07, FD09, FD11ではPMTの輪郭が確認できるのに対して、FD00, FD02, FD06, FD08, FD10ではPMTの輪郭が確認できないことがわかる。これは鏡によって集光された後のPMTカメラ面上でのスポットのサイズが関係しているのだと考える。スポットサイズが大きい場合、スポットサイズが小さい場合に比べてPMT境界に入る光量の割合は小さくなる。そのため、PMT境界をまたぐ時の総受光量の減少自体は発生するものの、光源のフライトごとの発光量のふらつきなど他の要因に対して大きな変化ではないのだと考えられる。つまりPMT輪郭が確認できないFDは、確認できるFDに対してスポットサイズが大きいのだと推測する。関連して、PMT輪郭が確認できるFD群とできないFD群では設置に関わったメンバーが異なるという背景もある。

7.2 視野方向差の定量化

想定PMTを移動させ表れたPMTの輪郭と最もよく重なる位置を探し、そのときの想定PMTの元の位置からの移動分を想定視野方向と実際の視野方向の差とする。探索のイメージを図7.28に示す。具体的な手順は以下である。

1. 想定PMTの輪郭線をいくつか分割し距離が近い格子点を複数探してくる。
2. 1で得た格子点を持つ総受光量を足し合わせる。
3. 想定PMTを少しずらす。
4. 1～3を繰り返し2の総受光量の和が最も小さくなる位置を探す。

総受光量の和が最も小さくなった位置が2つのPMTが最も重なったものとしていいる。実際には、想定PMTの各辺から近い100点ずつ、計600点を取得した。また、想定PMTを仰角方位角各方向に 0.01° 刻みで移動させ元の位置から $\pm 0.5^\circ$ の範囲を探索した。

7.3 解析結果

各FDで生成された格子点に対して想定PMTを重ねたものを図7.29, 7.32, 7.35, 7.38, 7.41, 7.44, 7.47, 7.50, 7.53, 7.56, 7.59, 7.62に示す。この想定PMTを移動させ2つの六角形が重なる部分を探した。実際の解析結果として得られた総受光量分布を図7.30, 7.33, 7.36, 7.39, 7.42, 7.45, 7.48, 7.51, 7.54, 7.57, 7.60, 7.63に示す。0, 0が想定PMTの元の位置である。得られた値分だけ想定PMTを移動させると図7.31, 図7.34, 図7.37, 図7.40, 図7.43, 図7.46, 図7.49, 図7.52, 図7.55, 図7.58, 図7.61, 図7.64が得られる。FD07を例にとると、左下方向に動かしたときに総受光量の和が小さくなっていることがわかる。想定PMTを方位角方向に -0.04° 、仰角方向に -0.15° 動かしたときに和が最小になった。これが、想定している視野方向と実際の視野方向の差となる。なお、FD07は特に想定と実際の差が大きいFDであった。比較的差が少なかったFD03について図7.38, 図7.39, 図7.40を確認すると、FD03では方位角方向に $+0.01^\circ$ 、仰角方向に -0.03° のところまで二つの六角形が重なった。また、PMT輪郭の確認できなかったFDの例として、FD06の解析結果、図7.47, 図7.48, 図7.49を確認すると、PMT輪郭の確認できないFD06では解析が上手く適用できなかった。他のPMT輪郭が確認できないFDでも同様の結果となった。全てのFDについて得られた値を表7.1に纏める。

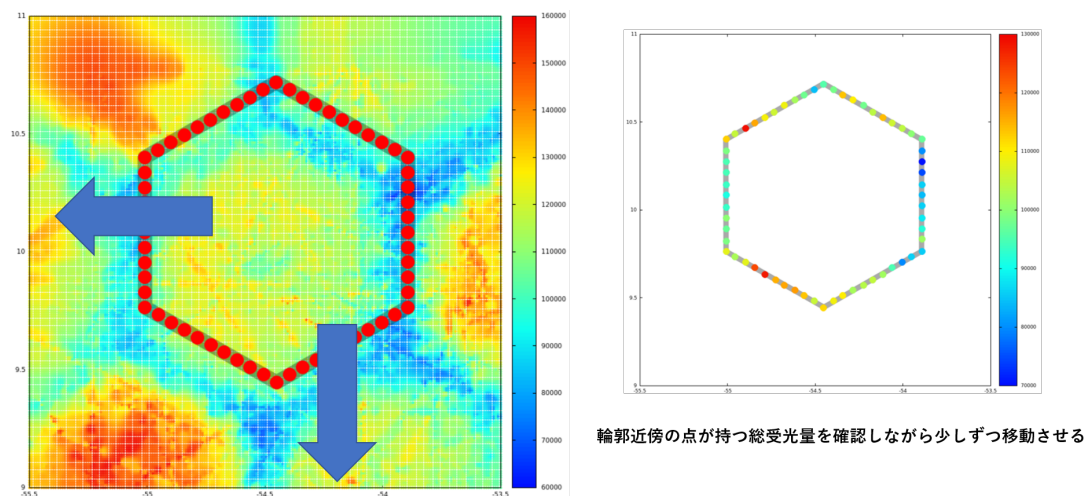


図7.28 PMT輪郭が重なる部分の探索

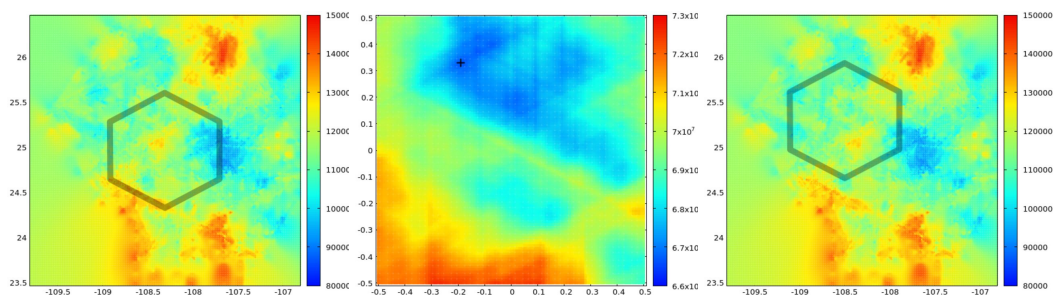


図 7.29
FD00 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.30
FD00 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.31
FD00 : 光量
和が最低と
なった位置

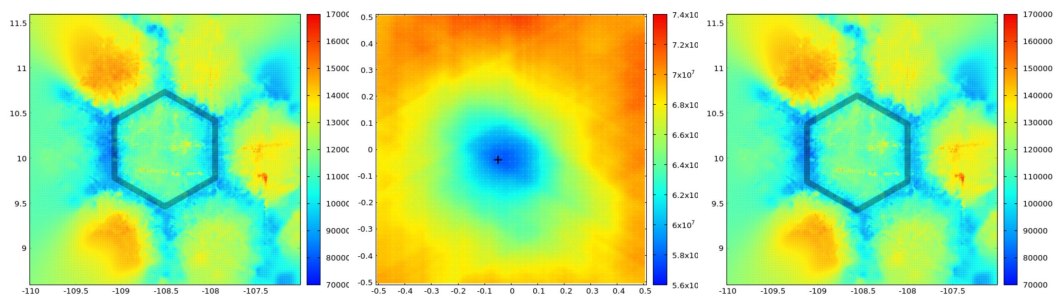


図 7.32
FD01 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.33
FD01 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.34
FD01 : 光量
和が最低と
なった位置

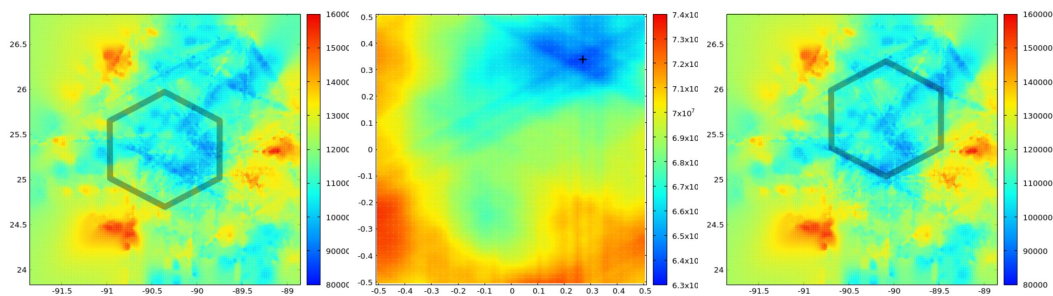


図 7.35
FD02 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.36
FD02 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.37
FD02 : 光量
和が最低と
なった位置

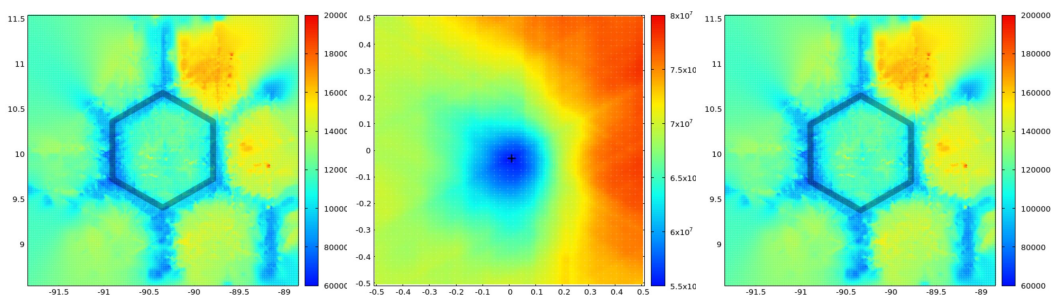


図 7.38
FD03 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.39
FD03 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.40
FD03 : 光量
和が最低と
なった位置

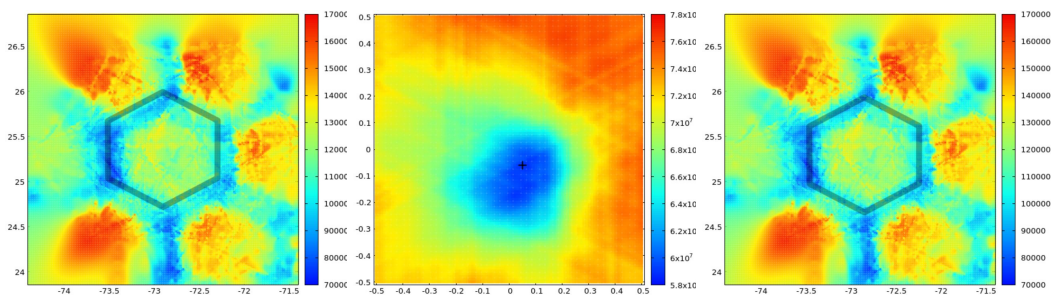


図 7.41
FD04 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.42
FD04 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.43
FD04 : 光量
和が最低と
なった位置

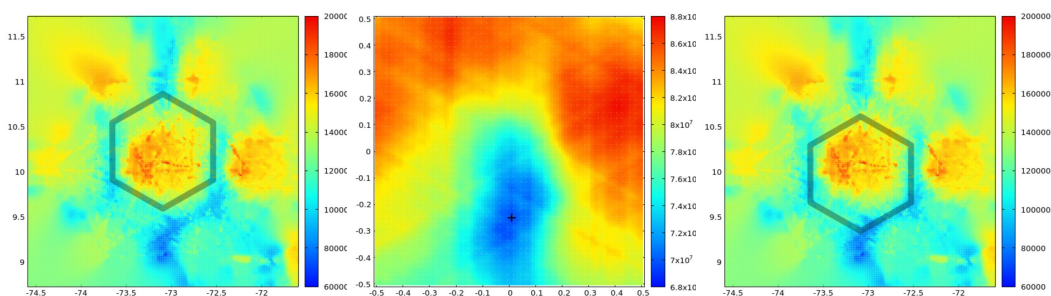


図 7.44
FD05 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.45
FD05 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.46
FD05 : 光量
和が最低と
なった位置

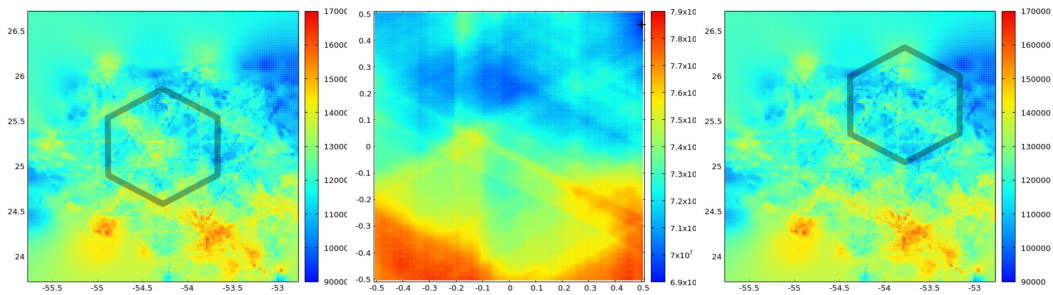


図 7.47
FD06 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.48
FD06 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.49
FD06 : 光量
和が最低と
なった位置

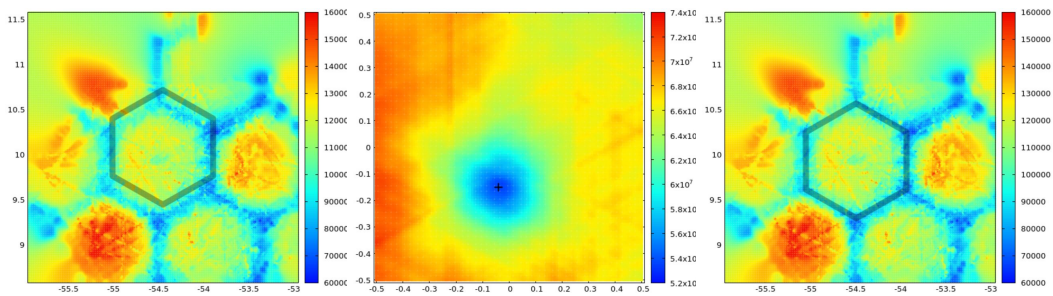


図 7.50
FD07 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.51
FD07 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.52
FD07 : 光量
和が最低と
なった位置

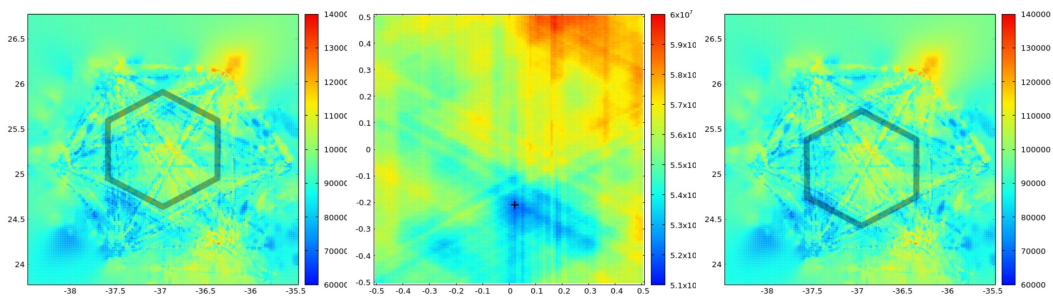


図 7.53
FD08 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.54
FD08 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.55
FD08 : 光量
和が最低と
なった位置

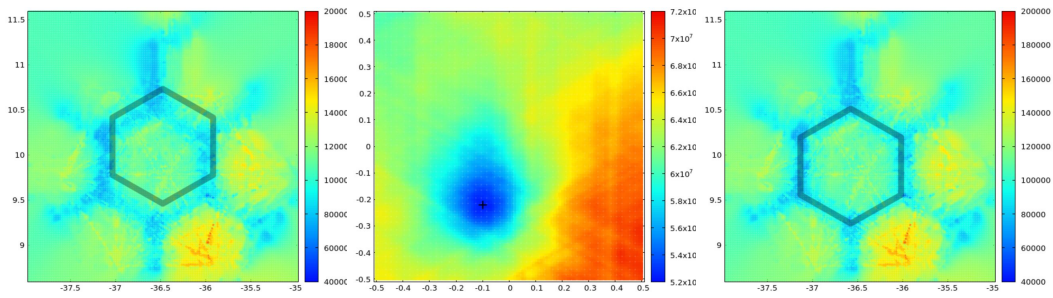


図 7.56
FD09 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.57
FD09 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.58
FD09 : 光量
和が最低と
なった位置

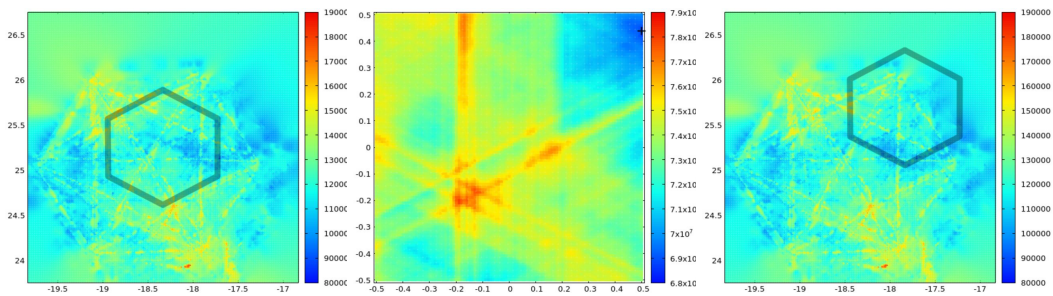


図 7.59
FD10 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.60
FD10 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.61
FD10 : 光量
和が最低と
なった位置

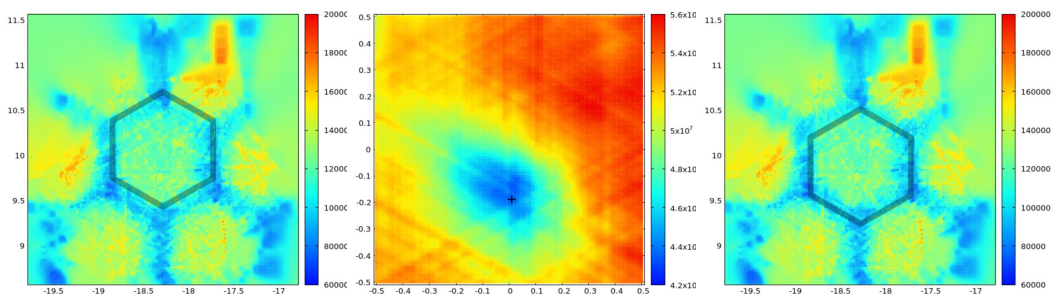


図 7.62
FD11 : 生成
記録と想定
PMT

図 7.63
FD11 : 輪郭
近傍で得た
光量分布

図 7.64
FD11 : 光量
和が最低と
なった位置

FD	Azimuth [deg]	Elevation [deg]
00	-	-
01	-0.05°	-0.04°
02	-	-
03	0.01°	-0.03°
04	0.05°	-0.06°
05	0.01°	-0.25°
06	-	-
07	-0.04°	-0.15°
08	-	-
09	-0.10°	-0.22°
10	-	-
11	0.01°	-0.19°

表 7.1 輪郭探索解析結果

7.4 誤差幅の検討

解析によって得られた値には誤差が存在する。解析そのものが持つ誤差について数値を求めることは行えなかったが、値を検討した部分について説明する。まず、Opt-copterの測位用GPSモジュールが持つ誤差として光源位置に $\pm 10\text{cm}$ の誤差が存在する。300m先を飛行する際10cmの変化は $0.01909 \dots \approx 0.02^\circ$ 程度の変化である。さらにデータの処理として補間生成を行ったためこれも影響する。補間に用いた重みに関わる値を変化させるだけでも解析結果に影響がある。式7.1では各方向の距離に対して4乗しているがこれを1, 2, 8乗に変えると図7.65, 図7.66, 図7.67, 図7.68のように得られるデータは変わり、表7.2に示すように求められる値も $\pm 0.01^\circ$ ほど変化する。誤差伝播の法則に従い2乗和の根を取ると $0.0223^\circ \dots$ の誤差となる。解析結果は最低でもこれ以上のふらつきを持っているといえる。

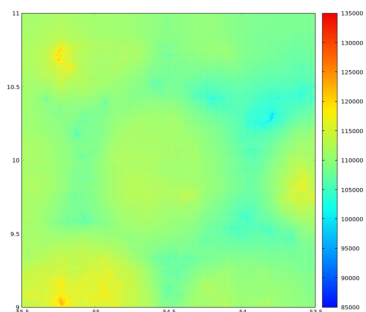


図 7.65 FD07 : 重み 1 乗での補間後

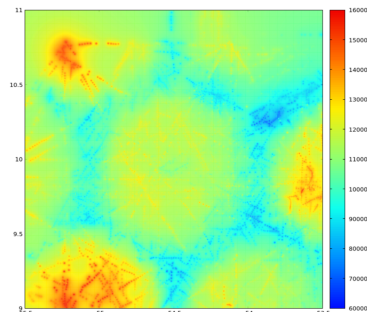


図 7.66 FD07 : 重み 2 乗での補間後

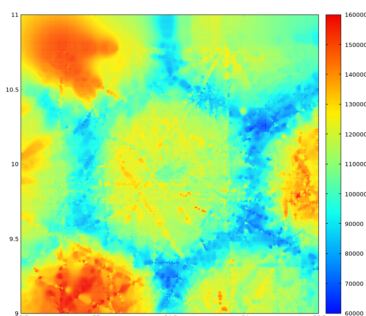


図 7.67 FD07 : 重み 4 乗での補間後

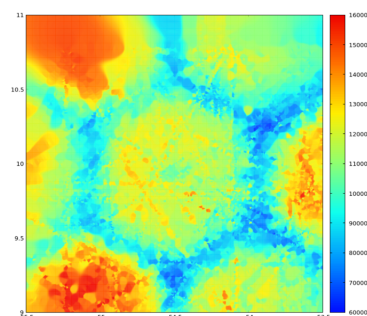


図 7.68 FD07 : 重み 8 乗での補間後

重み	Azimuth [deg]	Elevation [deg]
1 乗	-0.03°	-0.14°
2 乗	-0.05°	-0.14°
4 乗	-0.04°	-0.15°
8 乗	-0.04°	-0.15°

表 7.2 補間時の重みごとの解析結果

第 8 章

FD の受光量重心と光源位置の比較による視野方向解析

PMT の輪郭探索では，FD00，FD02，FD06，FD08，FD10 の視野方向を確認することが出来なかった．そこで，全ての FD に適用できる解析手法として，FD の受光記録位置と Opt-copter の光源位置を比較する解析を検討した．図 8.1 のように，FD の受光位置が一点に定まる場合，その時刻の Opt-copter の位置と比較することで，実際と想定 of FD 視野方向の差を求めることができる．

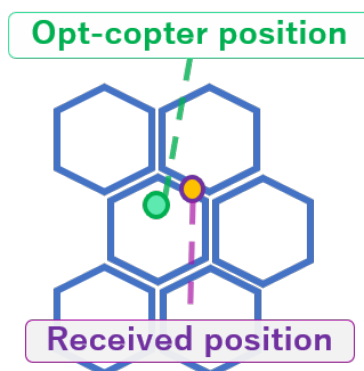


図 8.1 受光位置と光源位置の比較

8.1 受光量重心の算出と実際の記録

FD の受光位置を実際のデータから決めるには，図 8.2 のように光を記録した複数の PMT の記録受光量とそれぞれの PMT の中心座標を用いて，重心を算出する．ここで問題となるのは，Opt-copter の光源によって感面上に結像する光の拡

がり、スポットのサイズである。例として、スポットサイズが小さい場合と大きい場合を考える。図8.3のようにスポットが小さい場合、単一のPMTに強く光が記録される。重心座標の算出にはPMTの中心座標を用いるため、単一PMTに偏った記録で計算が行われるとそのPMT内の位置に関わらず重心座標はPMTの中心座標付近として扱われる。逆に図8.4のように、スポットサイズが大きく、多くのPMTに分散して光が記録された状態で重心の計算を行えば、正確に受光位置を決めることができる。つまり、FD00, FD02, FD06, FD08, FD10のようなスポットサイズが比較的大きいと考えられるFDの方が正確な解析を行えるといえる。

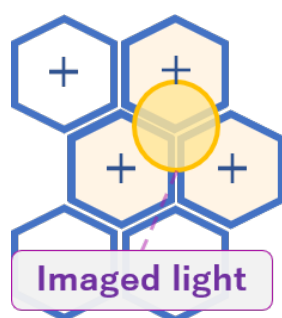


図 8.2 受光量重心の算出

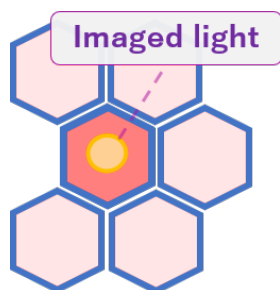


図 8.3 スポットサイズ小

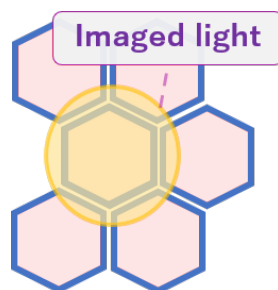


図 8.4 スポットサイズ大

実際に、図8.5に示すFD10の記録から算出したOpt-copter飛行時の受光量重心分布を確認すると、図8.6に示すOpt-copterの光源位置に対して、受光量重心が各PMTの中心座標に偏った記録になっていることがわかる。

8.2 受光量重心と光源位置の差

FDの受光量重心分布にOpt-copterの光源位置を重ねると図8.28が得られる。図8.28から受光量重心記録は、PMT中心に偏った記録になっているものの、全体としての傾向が確認できることがわかる。このFDでは、受光量重心に対して、全体的にOpt-copterの光源位置が下側に位置していることがわかる。実際の光源

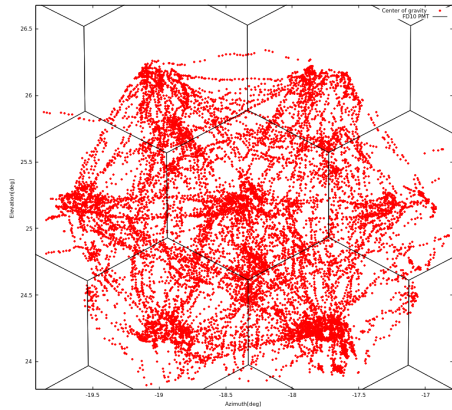


図 8.5 FD10 視野中心での受光量重心分布

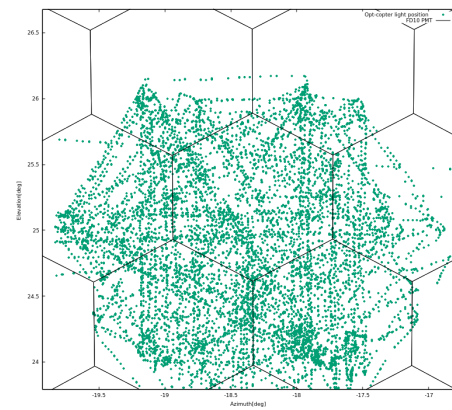


図 8.6 FD10 視野中心での光源位置

位置より上側に受光量重心が記録されるのは FD が想定より下を向いているからだと考えられる。これを受け、ある一点の記録では偏りが発生していても統計的にデータを処理することで実際と想定との視野方向の差を算出できると考えた。さらに、Opt-copter の飛行記録が一様であると仮定する場合、対称的にデータを抽出すると各 PMT 中心に偏る効果がそれぞれの PMT で相殺しあい無視できるとも考えた。具体的な計算としては、各光源位置から同時刻の受光量重心位置を引き算し平均の値をとる。

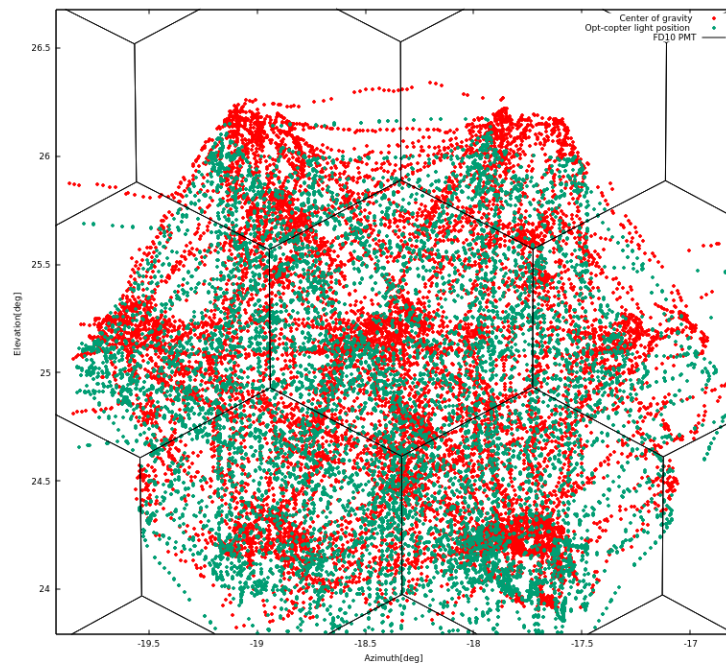


図 8.7 FD10 視野中心での受光量重心と光源位置

8.3 解析結果

上記の考えを元に，FD 視野中心付近から対称にデータを抽出し，各 Opt-copter の光源位置から同時刻の受光量重心位置を引き，差を求めた．この解析はデータを取得した全ての FD に適用できる．各 FD での抽出した受光量重心と光源位置を図 8.8 8.30 に，差の計算結果を図 8.9 図 8.31 に示し，差の平均値を表 8.1 に示す．例として FD10 の計算結果図 8.29 を確認すると，この解析では差の平均を代表値とした．差の平均は方位角方向に -0.04° ，仰角方向に -0.15° となり，FD10 は実際に対してこの値分間違えた想定をしていることが示された．

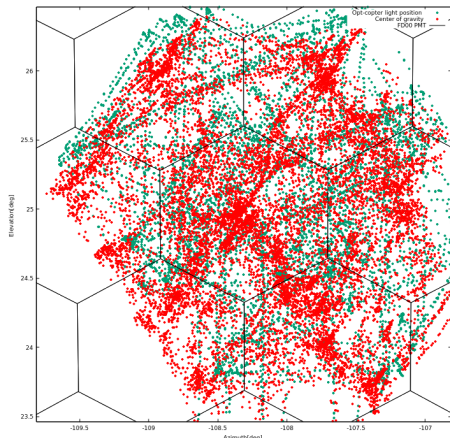


図 8.8 FD00 : 受光量重心と光源位置

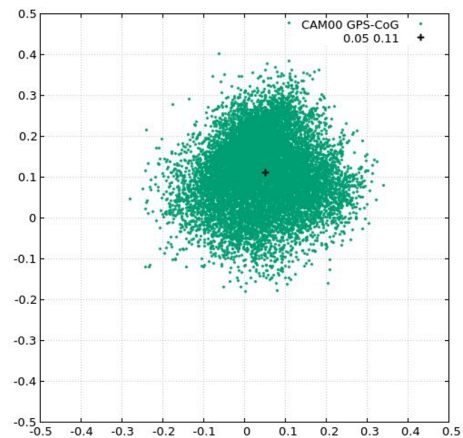


図 8.9 FD00 : 計算結果

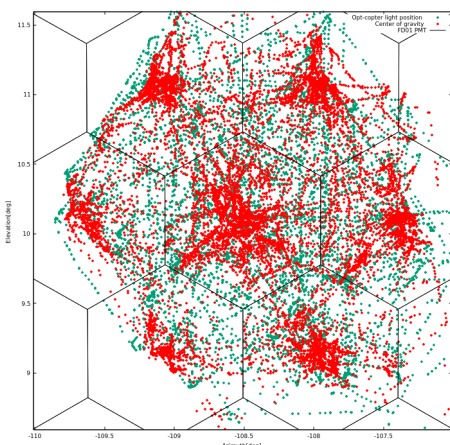


図 8.10 FD01 : 受光量重心と光源位置

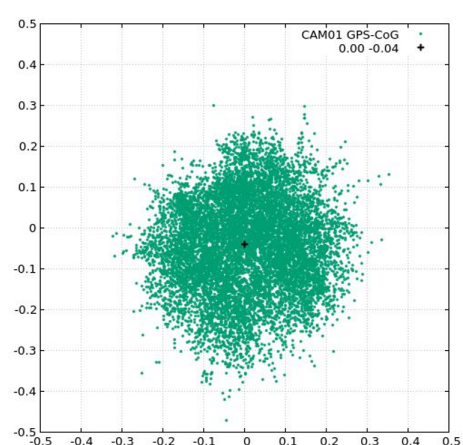


図 8.11 FD01 : 計算結果

8.4 コマ収差の影響やフライトの偏り検討

望遠鏡では光軸に対して斜めに入射した光は像面において 1 点に収束しない。これをコマ収差といい、光源位置が視野の外側に向かえば向かうほど像は歪み、外に伸びていく。また、フライトの光源位置に偏りがある場合、データ量が多い方向に解析結果は引き寄せられる。これらの影響を確認するために、PMT119 番と周囲の 6 本の PMT を基準にデータを抽出し上記の解析を適用した。抽出した受光量重心記録を図 8.32 に示す。さらに、それぞれの解析結果として差の平均を表 8.2 に示す。結果から最大で $\pm 0.02^\circ$ 程度の変化があることがわかった。これを収差やフライトの偏りによる影響の値とした。

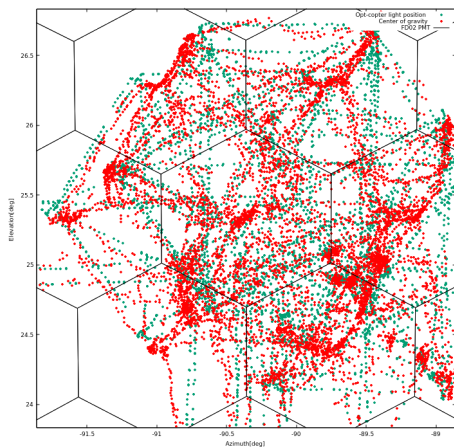


図 8.12 FD02 : 受光量重心と光源位置

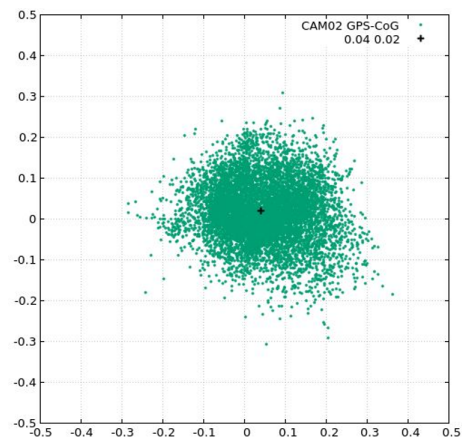


図 8.13 FD02 : 計算結果

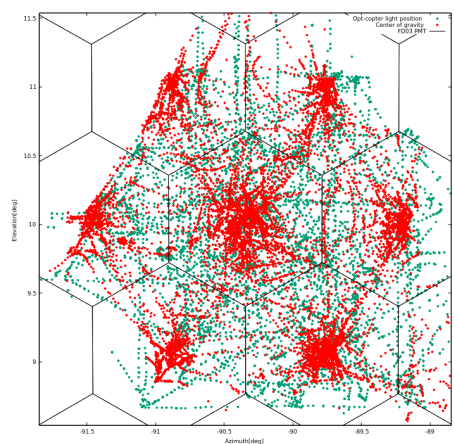


図 8.14 FD03 : 受光量重心と光源位置

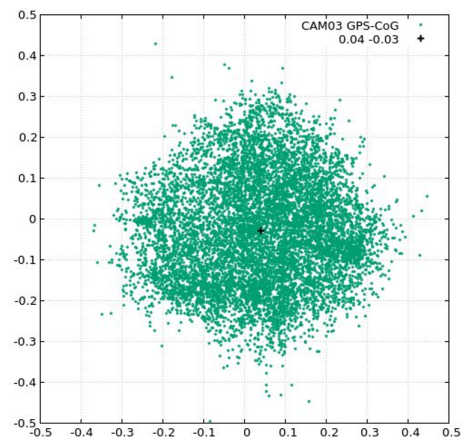


図 8.15 FD03 : 計算結果

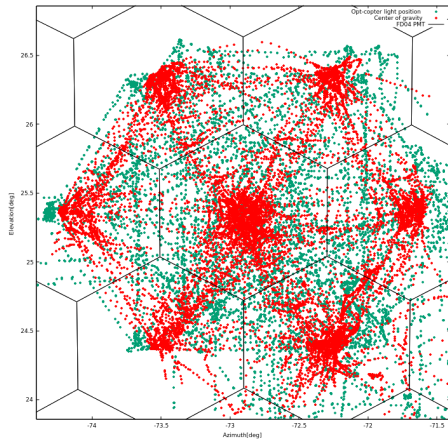


図 8.16 FD04 : 受光量重心と光源位置

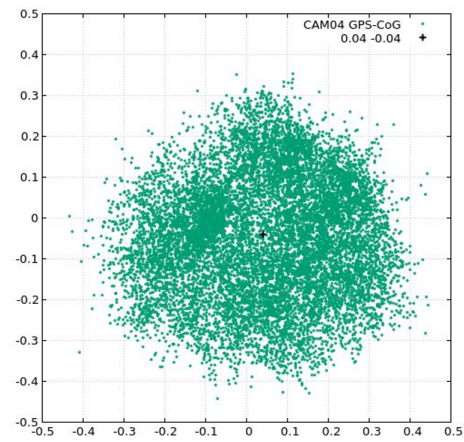


図 8.17 FD00 : 計算結果

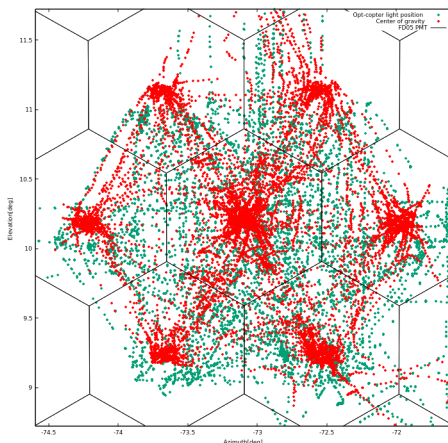


図 8.18 FD05 : 受光量重心と光源位置

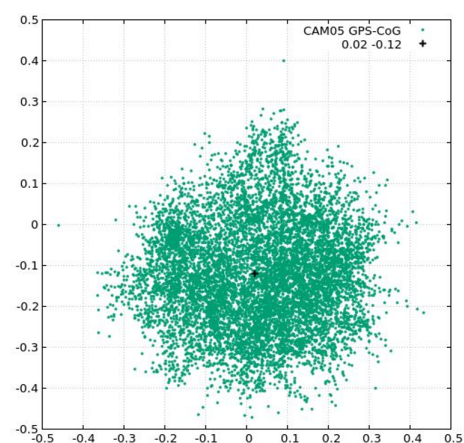


図 8.19 FD05 : 計算結果

8.5 誤差幅の検討

こちらの解析についても得られた値は誤差幅を持つ。解析そのものが持つ誤差幅として差を求めたときの誤差を表 8.3 に示す。標準偏差をデータ数の根で割った標準誤差は全て 0.001° 程度である。さらに、ここにも Opt-copter の測位精度 $\pm 10\text{cm} \approx \pm 0.02^\circ$ が影響する。データの抽出を変えたときの変化 ± 0.02 も合わせ誤差の伝播法則のもと二乗和の根をとると $0.028^\circ \approx 0.03^\circ$ となる。

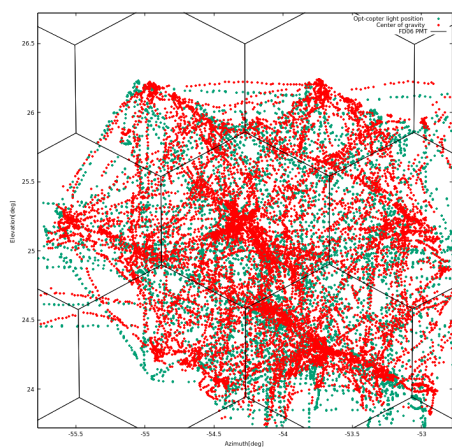


図 8.20 FD06 : 受光量重心と光源位置

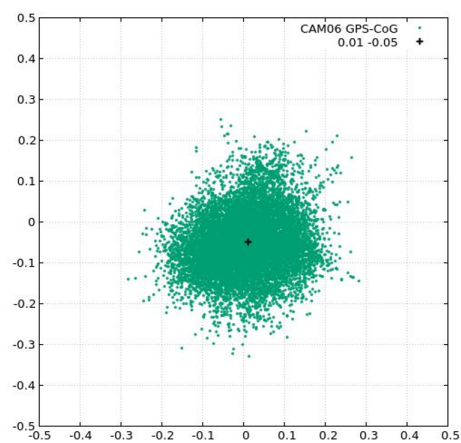


図 8.21 FD06 : 計算結果

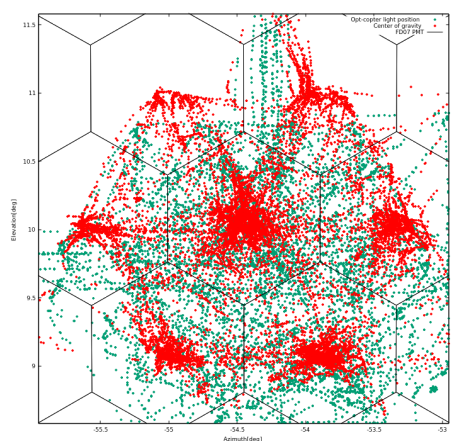


図 8.22 FD07 : 受光量重心と光源位置

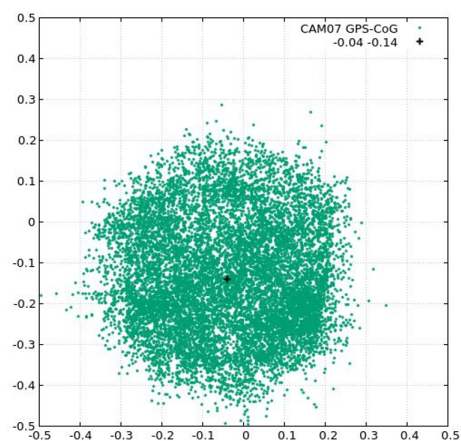


図 8.23 FD07 : 計算結果

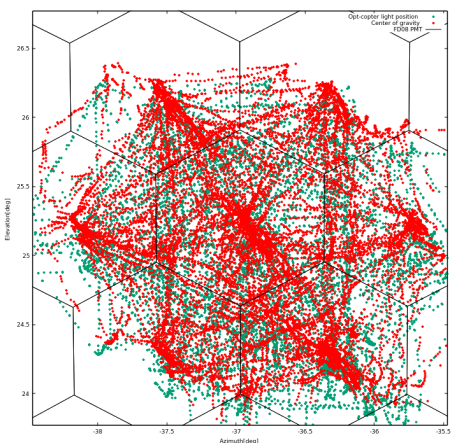


図 8.24 FD08 : 受光量重心と光源位置

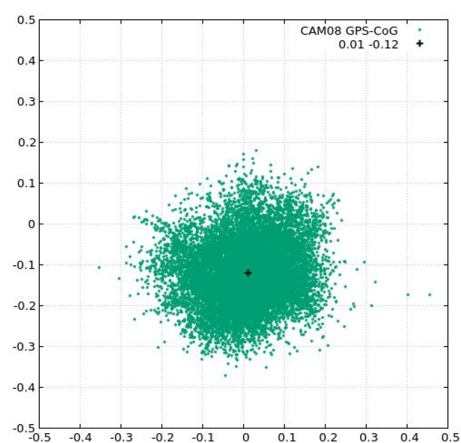


図 8.25 FD08 : 計算結果

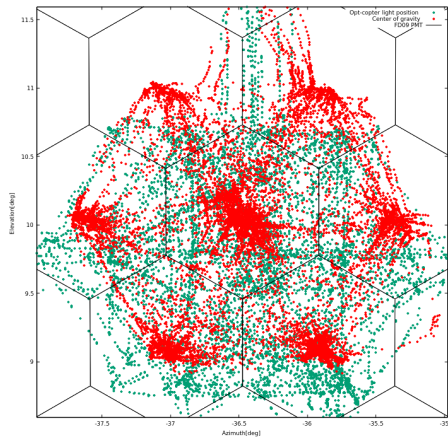


図 8.26 FD09 : 受光量重心と光源位置

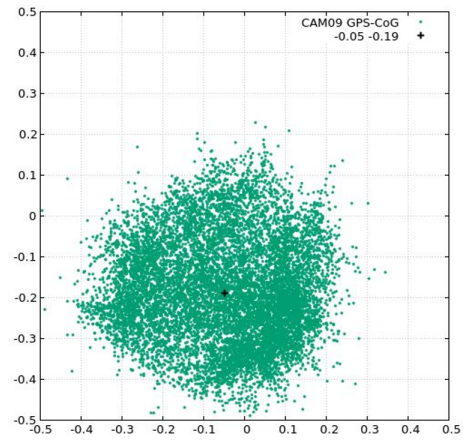


図 8.27 FD09 : 計算結果

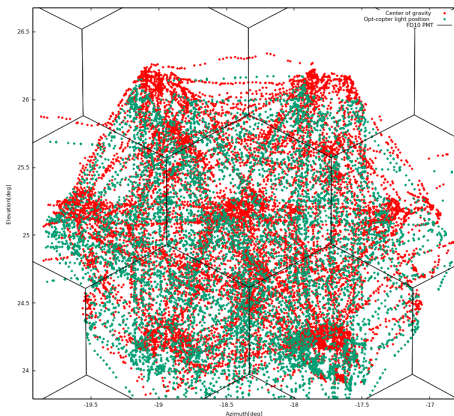


図 8.28 FD10 : 受光量重心と光源位置

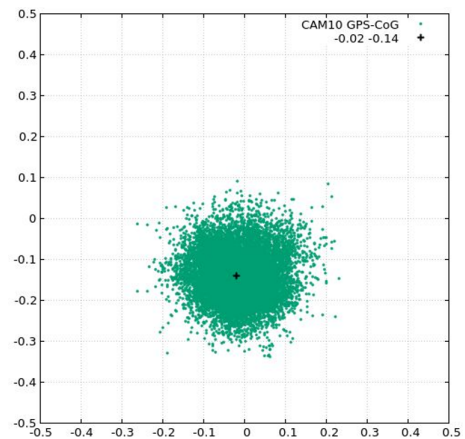


図 8.29 FD10 : 計算結果

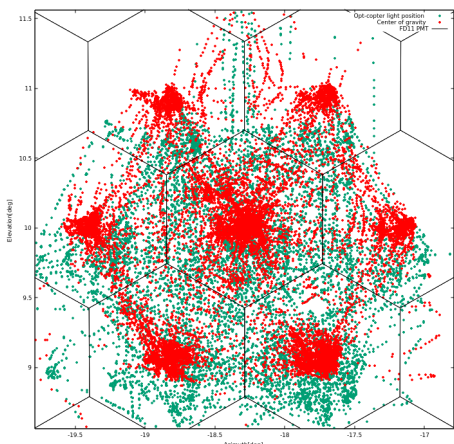


図 8.30 FD11 : 受光量重心と光源位置

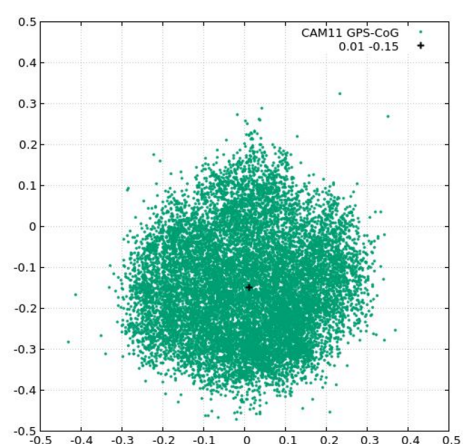


図 8.31 FD11 : 計算結果

FD	Azimuth [deg]	Elevation [deg]
00	0.05°	0.11°
01	0°	-0.04°
02	0.04°	0.02°
03	0.04°	-0.03°
04	0.04°	-0.04°
05	0.02°	-0.12°
06	0.01°	-0.05°
07	-0.04°	-0.14°
08	0.01°	-0.12°
09	-0.05°	-0.19°
10	-0.02	-0.14°
11	0.01°	-0.15°

表 8.1 位置比較解析結果

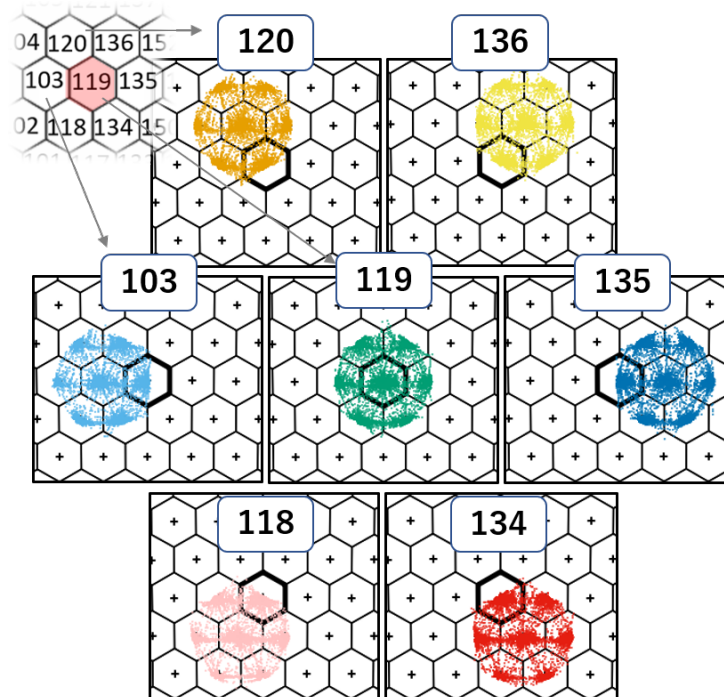


図 8.32 FD07 : 7 本の PMT を基準に抽出した受光量重心

基準 PMT	Azimuth [deg]	Elevation [deg]
120	-0.04°	-0.15°
136	-0.04°	-0.15°
103	-0.03°	-0.13°
119	-0.04°	-0.14°
135	-0.05°	-0.14°
118	-0.04°	-0.12°
134	-0.05°	-0.13°

表 8.2 データ抽出の基準ごとの解析結果

FD	Azimuth	Elevation	Azim の標準偏差	Elev の標準偏差	データ個数
00	0.05°	0.11°	0.09	0.09	11967
01	0°	-0.04°	0.11	0.11	10962
02	0.04°	0.02°	0.09	0.07	8267
03	0.04°	-0.03°	0.14	0.13	10058
04	0.04°	-0.04°	0.16	0.14	13448
05	0.02°	-0.12°	0.14	0.13	10293
06	0.01°	-0.05°	0.08	0.07	11745
07	-0.04°	-0.14°	0.15	0.14	12813
08	0.01°	-0.12°	0.09	0.08	15513
09	-0.05°	-0.19°	0.14	0.12	11874
10	-0.02°	-0.14°	0.06	0.06	13840
11	0.01°	-0.15°	0.13	0.13	14547

表 8.3 位置比較解析の誤差

第9章

視野方向解析結果の比較

2つの解析手法を用いて、BRMステーションFDの視野方向を特定した。便宜上1つ目の手法を輪郭解析，2つ目の手法を重心解析と呼ぶこととする。2つの解析により得られた値を改めて表9.1に示す。

FD	輪郭解析 Azimuth	輪郭解析 Elevation	重心解析 Azimuth	重心解析 Elevation
00	-	-	0.05°	0.11°
01	-0.05°	-0.04°	0°	-0.04°
02	-	-	0.04°	0.02°
03	0.01°	-0.03°	0.04°	-0.03°
04	0.05°	-0.06°	0.04°	-0.04°
05	0.01°	-0.25°	0.02°	-0.12°
06	-	-	0.01°	-0.05°
07	-0.04°	-0.14°	-0.04°	-0.14°
08	-	-	0.01°	-0.12°
09	-0.1°	-0.22°	-0.05°	-0.19°
10	-	-	-0.02°	-0.14°
11	0.01°	-0.19°	0.01°	-0.15°

表 9.1 2手法の解析結果

また，それぞれに得られた値でPMT輪郭を移動・修正したものを図9.1に示す。輪郭解析が適用できたものについては2つの手法で概ね似たような結果が得られていることがわかる。結果のElevation値を比較したものを図9.2に示す。重心解析の結果には検討し誤差幅 $\pm 0.03^\circ$ をエラーバーとしてつけている。輪郭解

析結果は値を正確に決められていないのでエラーバーは表示していない。2つの解析は元は同じ観測データによるものであるが、解析手法に誤りがあれば結果が一致しないことも考えられた。しかし図9.2から2つの解析による値は重心解析の誤差の範囲で一致していることが確認できた。また2つの解析は、FDごとの集光特性による影響が解析の正しさに対して真逆に働く相補的な関係でもある。

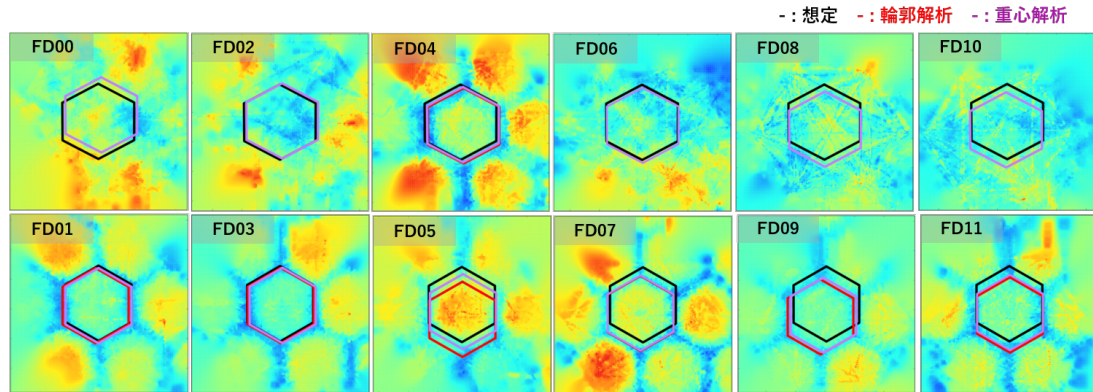


図9.1 各解析結果の値を適用する前後のPMT位置

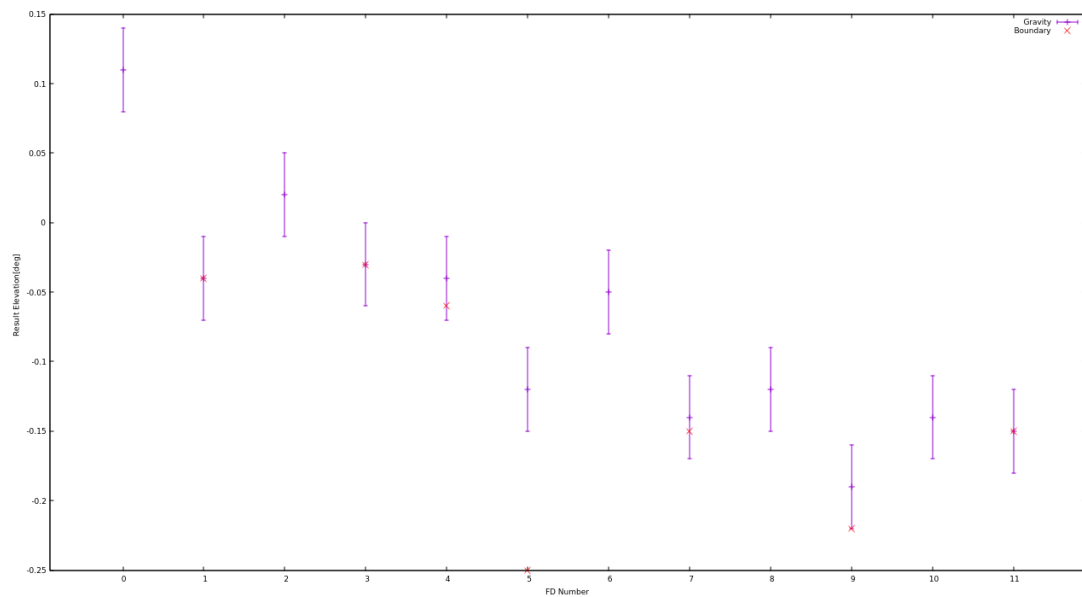


図9.2 各解析結果のElevation値

ここまでのことから、Opt-copterの目標数値である 0.1° を上回る精度でFDの視野方向を特定できたと結論付ける。

第 10 章

結論

10.1 まとめ

大気蛍光望遠鏡 (FD) の校正用装置として, ドローンに標準光源と測位用 GPS モジュールを搭載した Opt-copter が開発された. TA 実験サイトの BRM ステーションで Opt-copter の観測実験を行い, 取得データから FD の視野方向について解析した. 現在の想定視野方向と実際の視野方向の違いについて BRM ステーションの全ての FD で数値を求めた. 解析結果の持つ誤差は $\pm 0.03^\circ$ 程度であり, Opt-copter の目標である 0.1° を上回る精度での視野方向決定を達成した.

10.2 今後の展望

今回得られた結果を宇宙線解析時の FD 視野方向に適用すると宇宙線のパラメータにどの程度変化があるのか確認する必要がある. FD のスポットサイズやコマ収差の影響を解析することも求められる. TA 実験サイトには 3 つのステーションが存在し, 新たな FD も設置されている. BRM ステーションの 12 台以外も Opt-copter の観測実験を行うことで, より高精度な宇宙線解析を目指せる. さらに, Opt-copter は TA 実験以外の検出器も校正可能であると期待される. 実際に, 他実験の検出器の校正を目指し新たな光源の開発にとりかかっている.